

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Bruno Babić**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl, dipl. ing.

Student:

Bruno Babić

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru prof.dr.sc. Zdravku Schauperlu na ideji rada, podijeljenom iskustvu, znanju te velikom strpljenju i potpori prilikom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Suzani Jakovljević na ustupljenim materijalima i korisnim savjetima tijekom izrade ovog rada. Zahvaljujem se Božidaru Bušetinčanu na uloženom trudu i vremenu tokom izrade eksperimentalnog djela ovog rada. Također zahvaljujem se i Hrvatskom društvu za materijale i tribologiju na financijskoj potpori i nabavi materijala za ovaj rad.

Bruno Babić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **BRUNO BABIĆ**

Mat. br.: 0035196409

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj ojačala na svojstva dentalnih akrilata**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of reinforcement on properties of dental acrylic resin**

Opis zadatka:

U suvremenoj stomatologiji sve češće se koriste dijelovi izrađeni od akrilnih polimera. To se pogotovo odnosi na mobilne protetske radove koji su u primjeni izloženi vanjskim opterećenjima. Stoga nije rijetka pojava lomova i oštećenja koja onemogućuju daljnju upotrebu i koje je potrebno sanirati ili zamijeniti cijeli proizvod. U ovom radu potrebno je istražiti utjecaj ojačanja u obliku staklenih vlakana na osnovna mehanička svojstva dentalnih akrilata.

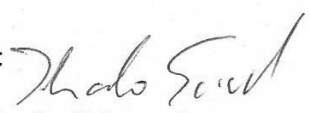
U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je izraditi uzorke kompozitnih materijala od akrilata ojačanog s dvije vrste ojačala te provesti ispitivanja mehaničkih svojstava. Ispitivanja trebaju biti provedena na epruvetama standardnih dimenzija, ali i na epruvetama čije dimenzije odgovaraju dimenzijama protetskih radova. Osim ispitivanja mehaničkih svojstava potrebno je i analizirati mikrostrukturu dobivenih kompozita. Dobivene rezultate je potrebno obraditi te donijeti zaključke o mogućnosti ojačanja dentalnih akrilata sa staklenim vlaknima.

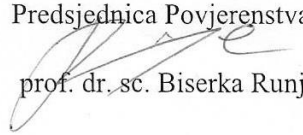
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
03. svibnja 2018.

Rok predaje rada:  
05. srpnja 2018.

Predviđeni datum obrane:  
11. srpnja 2018.  
12. srpnja 2018.  
13. srpnja 2018.

Zadatak zadao:   
prof. dr. sc. Zdravko Schauerl

Predsjednica Povjerenstva:  
  
prof. dr. sc. Biserka Runje

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
SAŽETAK.....	IV
SUMMARY .....	V
1. Uvod.....	1
2. Polimeri i kompoziti.....	3
2.1. Polimeri .....	3
2.1.1. <i>Akrilati</i> .....	4
2.1.1.1. <i>Poli(metil-metakrilat)</i> .....	4
2.2. Kompoziti.....	6
2.2.1. <i>Vrste vlakana</i> .....	7
2.3. Zubne proteze .....	9
3. Eksperimentalni dio.....	11
3.1. Izrada uzoraka .....	14
3.1.1. <i>Izrada kalupa</i> .....	14
3.1.2. <i>Materijali i pribor za izradu uzoraka</i> .....	15
3.1.3. <i>Materijali za ojačanja</i> .....	16
3.1.4. <i>Izrada uzoraka od akrilata bez ojačala</i> .....	17
3.1.5. <i>Izrada uzoraka od akrilata s neimpregniranim ojačalom</i> .....	19
3.1.6. <i>Izrada uzoraka od akrilata s impregniranim ojačalom</i> .....	21
3.2. Ispitivanje mehaničkih svojstava .....	25
3.2.1. <i>Udarni rad loma</i> .....	25
3.2.2. <i>Savijanje u tri točke</i> .....	28
3.2.3. <i>Statički vlačni pokus</i> .....	31
4. Rezultati .....	35
4.1. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma.....	35
4.2. Rezultati ispitivanja savijanja u tri točke .....	37
4.3. Rezultati statičkog vlačnog pokusa .....	39
5. Analiza prijelomne površine .....	41
5.1. Priprema uzoraka za SEM.....	41
5.2. Skenirajući elektronski mikroskop.....	43
5.2.1. <i>Rezultati analize prijelomne površine</i> .....	44
6. Zaključak.....	51
LITERATURA.....	53
PRILOZI.....	55

## POPIS SLIKA

Slika 1.	PMMA sintetiziran u obliku ploča i kuglica [3] .....	4
Slika 2.	Prikaz polimerizacije metil-metakrilata [6] .....	5
Slika 3.	Mogući raspored vlakana u matrici [9] .....	6
Slika 4.	Prikaz vrsta tkanja [8] .....	8
Slika 5.	Prikaz različitih vrsta zubnih proteza [14] .....	9
Slika 6.	Drveni okvir na staklenoj podlozi .....	14
Slika 7.	Digitalna vaga <i>Scout Pro</i> .....	15
Slika 8.	Pribor za miješanje .....	16
Slika 9.	Staklena vlakna Kelteks 160 [19] .....	16
Slika 10.	Miješanje MelioDent praha i tekućine .....	17
Slika 11.	Uljevanje PMMA u prvi kalup .....	18
Slika 12.	Ploča PMMA 1 s pokrovnim staklom i utezima .....	18
Slika 13.	Neimpregnirana staklena vlakna .....	19
Slika 14.	Zaglađivanje staklenih vlakana ploče PMMA 2 .....	20
Slika 15.	Uljevanje ostatka materijala za ploču PMMA 2 .....	20
Slika 16.	Impregnirana staklena vlakna .....	21
Slika 17.	Ploča PMMA 3 izvan kalupa .....	22
Slika 18.	Epruvete za statički vlačni pokus – prvi ciklus ispitivanja .....	23
Slika 19.	Epruvete za prvi ciklus ispitivanja savijanja u tri točke i udarnog rada loma .....	23
Slika 20.	Epruvete za statički vlačni pokus – drugi ciklus ispitivanja .....	24
Slika 21.	Epruvete za drugi ciklus ispitivanja savijanja u tri točke i udarnog rada loma ....	24
Slika 22.	Charpy-ev bat .....	25
Slika 23.	Pozicioniranje uzorka za Charpy-jev bat – prvi ciklus ispitivanja .....	27
Slika 24.	Pozicioniranje uzorka za Charpy-jev bat – drugi ciklus ispitivanja .....	27
Slika 25.	Univerzalna kidalica VEB Thüringer Industrierwerk .....	28
Slika 26.	Pozicioniranje epruvete za ispitivanje savijanja u tri točke .....	30
Slika 27.	Prikaz tijeka ispitivanja savijanja u tri točke .....	30
Slika 28.	Prikaz stegnute epruvete za prvi ciklus ispitivanja statičkog vlačnog pokusa .....	32
Slika 29.	Lom epruvete u prvom ciklusu ispitivanja statičkog vlačnog pokusa .....	33
Slika 30.	Pozicioniranje epruvete u drugom ciklusu ispitivanja statičkog vlačnog pokusa ..	34
Slika 31.	Lom epruvete u drugom ciklusu ispitivanja statičkog vlačnog pokusa .....	34
Slika 32.	Uređaj za naparivanje Emitec .....	41
Slika 33.	Uzorci u uređaju za naparivanje .....	42
Slika 34.	SEM Tescan Vega 5136 .....	43
Slika 35.	Radna komora SEM-a Tescan Vega 5136 .....	43

## POPIS TABLICA

Tablica 1.	Prikaz vrsta staklenih vlakana [11] .....	7
Tablica 2.	Svojstva različitih vrsta tkanja [12].....	8
Tablica 3.	Norme korištene u prvom ciklusu ispitivanja .....	11
Tablica 4.	Prvi ciklus ispitivanja .....	12
Tablica 5.	Drugi ciklus ispitivanja .....	13
Tablica 6.	Dimenzije epruveta za prvi ciklus ispitivanja udarnog rada loma .....	26
Tablica 7.	Dimenzije epruveta za drugi ciklus ispitivanja udarnog rada loma .....	26
Tablica 8.	Dimenzije epruveta za prvi ciklus ispitivanja savijanja u tri točke.....	29
Tablica 9.	Dimenzije epruveta za drugi ciklus ispitivanja savijanja u tri točke .....	29
Tablica 10.	Dimenzije epruveta za prvi ciklus ispitivanja statičkog vlačnog pokusa.....	31
Tablica 11.	Dimenzije epruveta za drugi ciklus ispitivanja statičkog vlačnog pokusa.....	32
Tablica 12.	Rezultati udarnog rada loma za prvi ciklus ispitivanja .....	35
Tablica 13.	Rezultati udarnog rada loma za drugi ciklus ispitivanja .....	36
Tablica 14.	Rezultati ispitivanja savijanja u tri točke za prvi ciklus ispitivanja .....	37
Tablica 15.	Rezultati ispitivanja savijanja u tri točke za drugi ciklus ispitivanja .....	38
Tablica 16.	Rezultati ispitivanja prvog ciklusa statičkog vlačnog pokusa.....	39
Tablica 17.	Rezultati ispitivanja drugog ciklusa statičkog vlačnog pokusa.....	40
Tablica 18.	Analiza prijelomne površina, prvi ciklus – savijanje u tri točke.....	45
Tablica 19.	Analiza prijelomne površina, prvi ciklus – statički vlačni pokus .....	46
Tablica 20.	Analiza prijelomne površina, prvi ciklus – udarni rad loma.....	47
Tablica 21.	Analiza prijelomne površina, drugi ciklus – savijanje u tri točke.....	48
Tablica 22.	Analiza prijelomne površina, drugi ciklus – statički vlačni pokus .....	49
Tablica 22.	Analiza prijelomne površina, drugi ciklus – udarni rad loma .....	50

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$F_{maks}$	N	Maksimalna sila
$R_m$	$N/mm^2$	Vlačna čvrstoća
$R_{m_s}$	$N/mm^2$	Savojna čvrstoća
E	J	Energija
h	mm	Debljina epruvete/ploče
$h_s$	mm	Srednja vrijednost debljine epruveta
b	mm	Širina epruvete
L	mm	Razmak između oslonaca
$\sigma_x$	mm	Prosječno odstupanje od aritmetičke sredine
$\bar{x}$	mm	Aritmetička sredina
MMA	-	Metil-metakrilat
PMMA	-	Poli(metil-metakrilat)
PMMA 1	-	Ploča bez ojačanja, h=4 mm
PMMA 2	-	Ploča s impregniranim staklenim vlaknima, h=4 mm
PMMA 3	-	Ploča s neimpregniranim staklenim vlaknima, h=4 mm
PMMA 4	-	Ploča bez ojačanja, h= 1,2 mm
PMMA 5	-	Ploča s impregniranim staklenim vlaknima, h=1,2 mm
PMMA 6	-	Ploča s neimpregniranim staklenim vlaknima, h=1,2 mm
SEM	-	Skenirajući elektronski mikroskop



## SAŽETAK

Temeljna ideja ovog diplomskog rada je ispitati utjecaj ojačanja na mehanička svojstva polimera koji se koriste u stomatologiji. Ovaj diplomski rad je napravljen u dva djela. Prvi dio se sastoji od kraće teorijske osnove polimera i kompozita, na kojima se temelji ovaj rad. Drugi dio ovog diplomskog rada predstavlja eksperimentalni dio u kojem su opisani postupci izrade uzoraka i ispitivanja mehaničkih svojstava. Ispitivanja su provedena na tri grupe uzoraka: polimer bez ojačanja, polimer s neimpregniranim ojačanjem i polimer s impregniranim ojačanjem. U diplomskom radu korišten je polimer poli(metil-metakrilat) i ojačalo od staklenih vlakana. Provedena su ispitivanja udarnog rada loma, statičkog vlačnog pokusa i savijanja u tri točke. Naposljetku prijelomna površina uzoraka je analizirana na skenirajućem elektronskom mikroskopu te su dani rezultati ispitivanja i zaključak.

Ključne riječi: zubne proteze; staklena vlakna; polimerni kompozit; mehanička svojstva; poli(metil-metakrilat) (PMMA)

## SUMMARY

The aim of this thesis was to study the effect of different reinforcements on mechanical properties of polymers used in dental medicine. The thesis consists of two parts. The first part presents a brief theoretical overview of polymers and composites while the second part focuses on the experimental part of the study, presenting the fabrication of samples and testing their mechanical properties. The tests were performed on three groups of samples: non-reinforced polymers, polymers containing non-impregnated glass fibre reinforcement and polymers containing impregnated glass fibre reinforcement. Polymethyl-methacrylate (PMMA) and glass fibre reinforcements were used in these tests. The fracture impact, static tensile, and three-point-bend tests were also carried out. Finally, the fracture surfaces of the samples were analyzed using a scanning electron microscope. The results of the analysis were presented along with the conclusion.

Key words: dentures; glass fibers; polymer composite; mechanical properties; polymethyl-methacrylate (PMMA)

## 1. Uvod

Današnje društvo postavlja izrazito visoke zahtjeve prilikom razvoja novih proizvoda. Proizvodi postaju sve složeniji, a rokovi za izradu proizvoda sve kraći. Razvoj i konstanta potraga za novim materijalima i tehnologijama je izrazito bitan životni čimbenik, budući da se napretkom tehnologije i novim rješenjima znatno poboljšava čovjekov način života. Inženjeri su danas suočeni s proizvodnim zahtjevima, koje često nije moguće ispuniti konvencionalnim metodama i materijalima. Materijali koji predstavljaju veliku etapu u daljnjem industrijskom razvoju su kompozitni materijali i tehnologije proizvodnje kompozitnih materijala.

Polimeri su materijali koji su izrazito razvijani tokom 20. stoljeća. Polimerne materijale karakteriziraju relativno slaba mehanička svojstva te se isti često ojačavaju određenom vrstom ojačala s ciljem postizanja optimalnih mehaničkih svojstava. U ovom radu su obuhvaćeni kompoziti ojačani staklenim vlaknima u polimernoj matrici s ciljem krajnje primjene u dentalnoj medicini.

Zubne proteze koje se koriste u svakodnevnom životu izložene su brojnim čimbenicima, primjerice žvačnim silama koje su različite za svaku osobu, neželjeni udarci ili padovi proteza. Zbog lošijih mehaničkih svojstava polimera od kojih su proteze izrađene, često dolazi do pucanja proteza. Polimerni materijal od kojih se izrađuju zubne proteze ojačat će se staklenim vlaknima s ciljem poboljšanja svakodnevnog života ljudi koji koriste zubne proteze. Navedeno ojačanje staklenim vlaknima osigurat će bolja mehanička svojstva od dosadašnjih neojačanih polimera. Naravno mehanička svojstva nisu jedini cilj, vrlo izražen je faktor cijene i održivosti tehnologije potrebne za izradu zubnih proteza. Također zubne proteze ne smiju na nikakav način reagirati sa čovjekovim tijelom i pripadnim izlučevinama, moraju biti neutralne.

Zubne proteze unaprijeđene na ovaj način imaju zasigurno veliki potencijal poboljšavanja i olakšavanja života ljudi koji koriste zubne proteze. Ovakav pristup poboljšanju zubnih proteza naravno može omogućiti i veliku uštedu vremena tehničarima koji ne bi imali problem popravaka i dorada zubnih proteza zbog pucanja uslijed slučajnih udaraca ili padova. Istraživanje ovog diplomskog provedeno je s primarnim ciljem unaprijeđenja postojećeg proizvoda, pa tako i ljudskog života spajanjem već poznatih materijala i tehnologija na novi način.

Ovaj diplomski rad je napravljen u dva djela. U teorijskoj razradi opisani su polimeri koji se koriste u dentalnoj medicini. U eksperimentalnom djelu je ispitan hladno polimerizirajući akrilat koji se koristi za dentalnu medicinu. Ispitani su uzorci koji nisu ojačani te uzorci koji su ojačani staklenim i impregviranim staklenim vlaknima. Provedena su ispitivanja u dva ciklusa, prvi ciklus ispitivanja proveden je na debljini uzorka koja je unaprijed definirana određenom normom, dok je drugi ciklus ispitivanja proveden na debljini od 1,2 mm kako bi se približili debljini zubnih proteza koje se primjenjuju. U radu su opisane mogućnosti korištenja ojačanih zubnih proteza na dva načina te poboljšanja njihovih svojstava otpornosti na udarce i lomove. Naposljetku iznesen je zaključak i dan je pregled mogućnosti korištenja ojačanih zubnih proteza i održivosti tehnologije potrebne za njihovu izradu.

## 2. Polimeri i kompoziti

### 2.1. Polimeri

Polimeri su makromolekule sastavljene od više strukturnih jedinica (mera). Polimeri nastaju polimerizacijom monomera odnosno jednostavnih spojeva.

Prema načinu iniciranja reakcije polimerizacije polimere možemo podijeliti na:

- toplo polimerizirajuće,
- hladno polimerizirajuće,
- svjetlosno polimerizirajuće [1].

Toplo polimerizirajući proces odvija se pod određenim tlakom i temperaturom koje zahtjeva polimer. Kod hladno polimerizirajućeg procesa, polimerizacija se odvija na sobnoj temperaturi. Zubne proteze koje se danas koriste u dentalnoj medicini izrađuju se pretežito od toplo ili hladno polimerizirajućih materijala. Svjetlosno iniciran proces temelji se na iniciranju reakcije polimerizacije svjetlosnim snopom iz posebnog uređaja.

Prema utjecaju povišenih temperatura polimeri se dijele na:

- duromere,
- elastomere,
- plastomere.

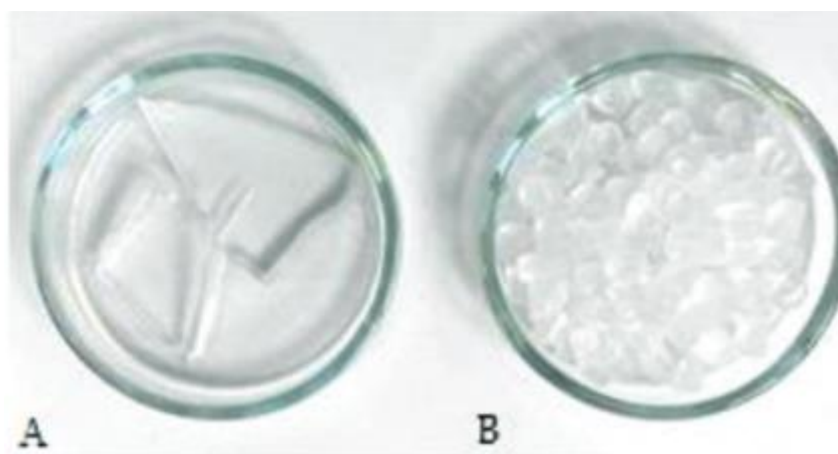
Duromere karakterizira potpuno umrežena struktura, vezani su primarnim vezama, nakon što se odvijer polimerizacija nije ih moguće opet zagrijati i prevesti u oblik prije samog tehnološkog postupka. Zbog navedenih karakteristika duromere se nastoji oblikovati u fazi dobivanja. Elastomere karakterizira kemijski djelomično umrežena struktura, netaljivi su, netopljivi, ali bubre. Sačinjeni su od primarnih i sekundarnih veza. Budući da se sastoje od obiju veza, prilikom dovođenja topline kidati će se sekundarne veze, dok će primarne veze i dalje postojati, zato je elastomere moguće omekšati, ali ne i rastaliti. Plastomere karakterizira povezanost makromolekula sekundarnim vezama, prilikom dovođenja topline sekundarne veze se kidaju i plastomer prelazi u taljevinu. Zbog karaktera sekundarnih veza dolazi do suprotne reakcije prilikom odvođenja topline, gdje se sekundarne veze formiraju i plastomer prelazi u kruto stanje. Plastomeri čine 90% proizvodnje polimernih materijala u današnje vrijeme.

### 2.1.1. Akrilati

Prema kemijskoj strukturi akrilati pripadaju skupini estera metakrilatne kiseline. U praksi se akrilatni polimeri za primjenu u stomatologiji pripremaju od komercijalnih dvokomponentnih sustava. Prva komponenta je polimer u prahu PMMA, a druga komponenta je kapljevina monomera MMA. Kapljevina sadržava smjesu monomera metil-metakrilata, odnosno MMA, i difunkcionalni monomer koji služi kao inicijator reakcije, najčešće hidrokinon [2].

#### 2.1.1.1 Poli(metil-metakrilat)

Godine 1935. tvrtka ICI predstavila je novi materijal poli(metil-metakrilat), odnosno PMMA, također poznat i kao "organsko staklo" zbog povezanosti svojstava transparentnosti s istim. PMMA pripada u skupinu plastomera. U početku, PMMA nije primjenjivan u stomatologiji zbog mnogih tehnoloških problema. Međutim, 1937. godine, razvijena je nova metoda sinteze spomenutog polimera. Razvijen je PMMA dobiven u obliku kuglica, a ne u obliku ploča kao što je to prethodno bio slučaj. Zatim je razvijena posebna metodologija koja je usmjerena na kombiniranje zrnca polimera s monomerom kako bi se dobila elastična masa [3]. Na slici 1. vidljiva je razlika PMMA sintetiziranog u pločama i kuglicama.

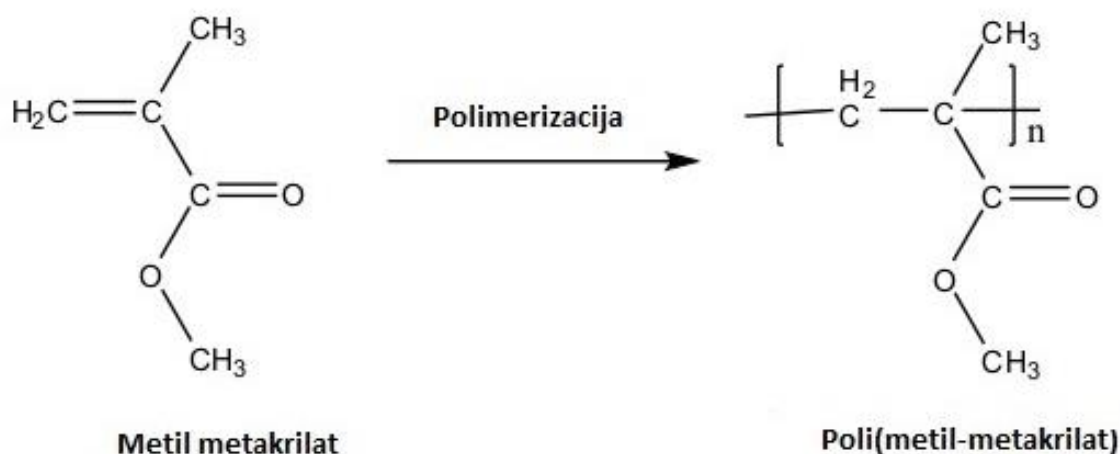


Slika 1. PMMA sintetiziran u obliku ploča - A i kuglica - B [3]

Poli(metil-metakrilat) karakteriziraju nesavršenosti koje bi daljnjim razvojem trebale biti uklonjene. Jedno od navedenih nedostataka tih polimera je nesumnjivo niska razina otpornosti na udarce. Više od 60% zubnih proteza je slomljeno ili napuknuto unutar prve 3 godine korištenja. Proces popravaka oštećenih zubnih materijala je dugotrajan i skup.

Također treba napomenuti, da su velika većina korisnika takvih materijala starije osobe za koje naknadne posjete stomatologu predstavljaju nelagodu [4,5].

Na slici 2. vidljiv je prikaz strukturni prikaz polimerizacije metil-metakrilata.



Slika 2. Prikaz polimerizacije metil-metakrilata [6]

PMMA je osim primjene u dentalnoj medicini našao veliku primjenu u kirurgiji, gdje se od akrilata izrađuju proteze i epiteze. PMMA karakteriziraju transparentnost, niska UV osjetljivost i dobra otpornost na atmosferilije, dobra preradljivost i dimenzijska postojanost. Negativna svojstva PMMA su niska temperatura primjene, od 60°C do 80 °C, osjetljivost na vlagu i krhkost zbog koje vrlo brzo dolazi do loma PMMA [7].

PMMA svojom glatkom površinom nakon izrade zubne proteze izuzetno pogoduje otpornosti na karijes i pojavu stomatitisa, odnosno upalu usne šupljine. Za održavanje zubnih proteza čistima koriste se zubna sredstva za čišćenje zbog uklanjanja *Candide albicans* i ostalih uzročnika upalnih procesa. Primjenom takvih sredstava obično dolazi do gubitka boje proteze. PMMA je potrebno modificirati kako bi se postigao negativan naboj površine da se onemogućí adhezija negativno nabijene *Candide albicans*, to je najčešća gljiva prisutna u ljudskom tijelu. Kopolimerizacijom, odnosno polimerizacijom sa dva različita monomera, metil-metakrilata - MMA i metakrilne kiseline - MA, postiže se negativno nabijena površina polimera i na taj način se smanjuje adhezija neželjenih uzročnika [2].

PMMA je poznat pod trgovačkim nazivima *Crylux*, *Plexiglas*, *Acrylite*, *Lucite* i *Perspex*.

## 2.2. Kompoziti

Kompozitni materijali su materijali koji nastaju kombinacijom dva ili više materijala s ciljem stvaranja materijala boljih svojstava od svojstava pojedinačnih materijala koji ga čine. Kompozitni materijali su višefazni materijali i najčešće je jedna faza kontinuirana i obuhvaća ostale disperzirane faze.

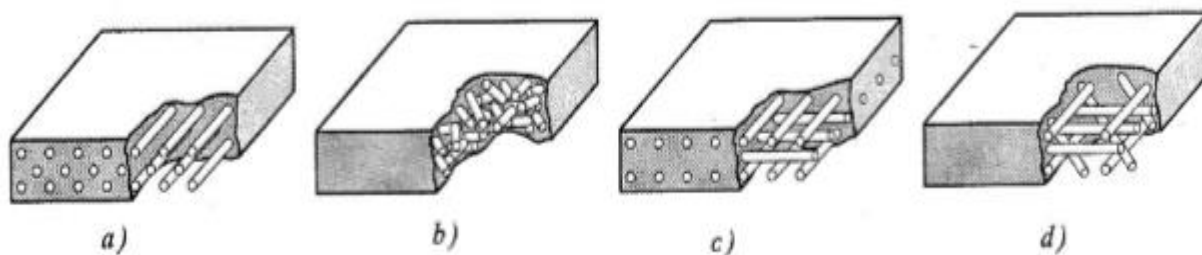
Prema disperziranoj fazi kompozite možemo podijeliti na:

- kompozite ojačane česticama,
- kompozite ojačane vlaknima,
- slojevite kompozite [1].

Prema vrsti matrice kompozite možemo podijeliti na:

- metalne kompozite,
- keramičke kompozite,
- polimerne kompozite,
- ugljične kompozite.

Ponašanje kompozitnih materijala ovisi o svojstvima matrice i svojstvima ojačala, veličini i raspodjeli konstituenata, obliku konstituenata, volumnom udjelu konstituenata te jačini veza između konstituenata [8]. Vlaknima ojačani kompoziti se najčešće primjenjuju u dentalnoj medicini. Najvažnija zadaća matrice je da drži ojačala zajedno te da ih štiti od vanjskih utjecaja i prenosi opterećenje na vlakna. Karakteristike kompozita ojačanih vlaknima ovise o omjeru duljine i promjera vlakna, volumnom udjelu vlakana, usmjerenosti vlakana te svojstvima vlakana i matrice [9]. Mogući rasporedi vlakana u matrici prikazani su na slici 3.



Slika 3. Mogući raspored vlakana u matrici. Kontinuirana jednosmjerna vlakna – a, slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna – b, ortogonalno raspoređena vlakna – c, višesmjerno usmjerena vlakna – d [9]

Gornja granica je oko 40 % vlakana kako bi se ista mogla u potpunosti okružiti matricom. U slučaju ojačanja sa vlaknima, svojstva će biti anizotropna, odnosno bolja u smjeru vlakana.



### 2.2.1. Vrste vlakana

Razlikujemo aramidna, staklena, ugljična, polimerna, keramička, bor i prirodna vlakna.

Vlaknima ojačani kompoziti našli su svoju uporabu u gotovo svim dijelovima stomatološke struke: parodontologiji, restaurativnoj stomatologiji, traumatologiji i ortodonciji. Staklena vlakna se često koriste u dentalnoj medicini. Prednosti staklenih vlakana su niska cijena i visoka specifična čvrstoća, dok su nedostaci istih niska krutost i niska dinamička izdržljivost.

Vlakna koja se stavljaju u matricu mogu biti izrađena u dva osnovna oblika:

- predimpregnirana,
- neimpregnirana [10].

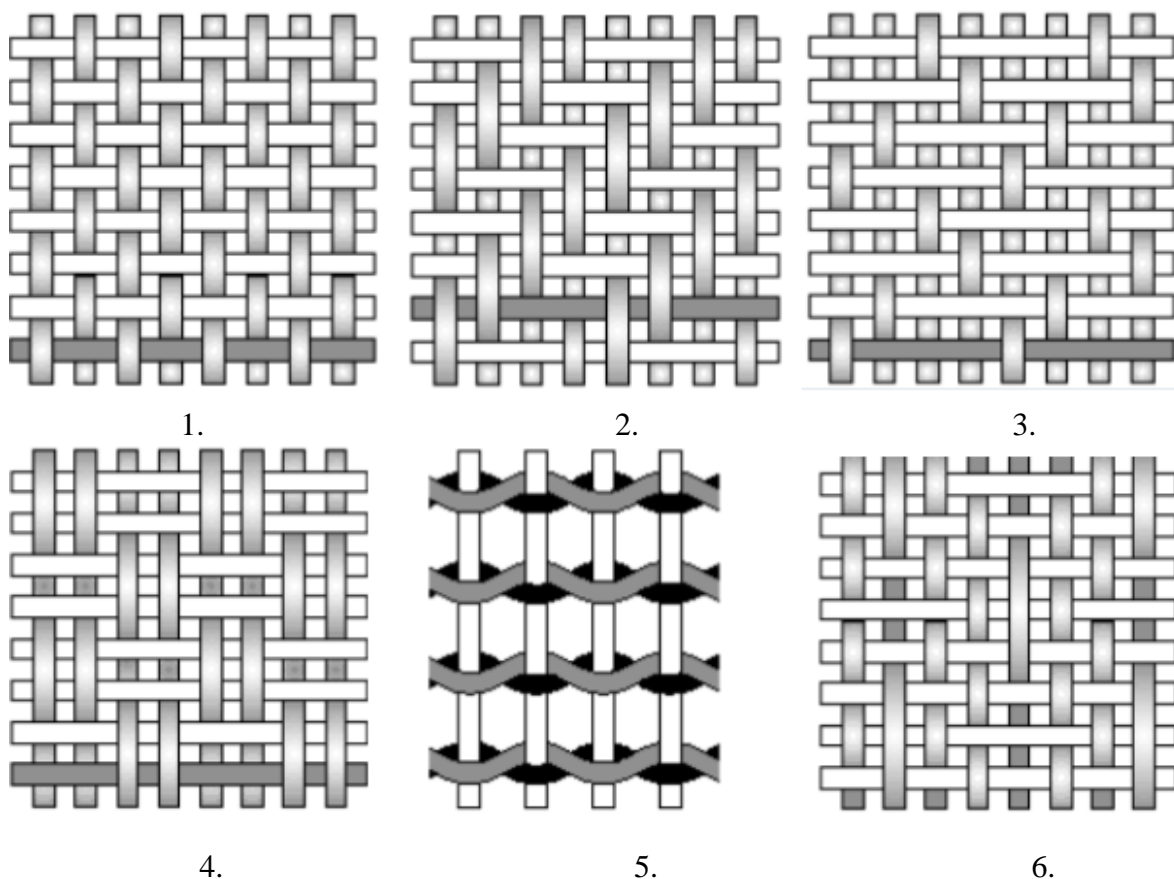
Predimpregnirana vlakna već su obložena određenom kompozitnom osnovom, dok neimpregnirana vlakna nisu obložena. U tablici 1. prikazane su oznake vrsta staklenih vlakana i njihovo osnovno svojstvo na kojem se temelji navedena oznaka.

Tablica 1. Prikaz vrsta staklenih vlakana [11]

Oznaka / značenje oznake na engleskom	Svojstvo
E / electrical	Niska električna provodljivost
S / strength	Visoka čvrstoća
C / chemical	Visoka kemijska otpornost
M / modulus	Visoka krutost
A / alkali	Otpornost na lužine
D / dielectric	Niska dielektrična konstanta

U dentalnoj medicini koriste se najčešće E staklena vlakna koja i čine 90 % proizvodnje staklenih vlakana za kompozite sa polimernom matricom.

Na slici 4. vidljiva su vrsta tkanja u kojima se staklena vlakna mogu izraditi.



Slika 4. Prikaz vrsta tkanja. Plain - 1, Twill - 2, Satin – 3, Basket - 4, Leno - 5, Mock Leno - 6 [8].

U tablici 2. dan je prikaz svojstava određenog tkanja. Svojstva u tablici 2. rangirana su ocjenama od 1 do 5, pri čemu vrijednost ocjene 1 opisuje iznimno loša svojstva, ocjena 2 opisuje loša svojstva, ocjena 3 prihvatljiva svojstva, ocjena 4 dobra svojstva te ocjena 5 odlična svojstva.

Tablica 2. Svojstva različitih vrsta tkanja [12]

<b>Tkanje</b> <b>Svojstvo</b>	<b>Plain</b>	<b>Twill</b>	<b>Satin</b>	<b>Basket</b>	<b>Leno</b>	<b>Mock leno</b>
Stabilnost	4	3	2	2	5	3
Savitljivost	2	4	5	3	1	2
Niska poroznost	3	4	5	2	1	3
Glatkoća	2	3	5	2	1	2
Balans	4	4	2	4	2	4
Simetričnost	5	3	1	3	1	4
Nisko nabiranje tkanja	2	3	4	2	2	2

### 2.3. Zubne proteze

Zubne proteze dijele se na djelomične i totalne. Zubne proteze koje zamjenjuju sve prirodne zube nazivamo totalnim zubnim protezama, dok zubne proteze koje zamjenjuju jedan ili više prirodnih zubi nazivamo djelomičnim zubnim protezama. Totalne proteze mogu se pričvrstiti implantatima na gornju ili donju čeljust i tako osigurati ravnomjerniji raspored naprezanja uslijed žvačnih sila na gornjoj odnosno donjoj čeljusti. Baza proteze kod totalnih proteza je dio proteze koji prijanja uz sluznicu. Baza proteze koja nosi umjetne zube se izrađuje kombinacijom akrilata i metala ili samo akrilata, metalni dio je vrlo tanak dok se ružičasti akrilat svojom bojom uklapa u okolinu sluznice. Djelomične proteze se također sastoje od kombinacije metalne konstrukcije koja osigurava prihvat na susjedne zube i akrilata koji je kao i kod totalnih proteza smješten na sluznicu gornje ili donje čeljusti. Djelomične se proteze kada je to moguće nastoje izraditi samo od akrilata. Valja napomenuti da se u praksi problem bezubosti pokušava riješiti češće totalnim protezama na gornjoj nego na donjoj čeljusti, jer je donja čeljust pomična i veća je mogućnost gubitka stabilnosti i pomicanja totalnih proteza. U navedenim slučajevima totalne proteze se gotovo uvijek pričvrste implantatima [13]. Na slici 5. vidljive su navedene vrste zubnih proteza



Slika 5. Prikaz različitih vrsta zubnih proteza. Djelomična proteza – 1, totalna proteza – 2, totalna proteza sa implantatima – 3 [14].

Sve navedene vrste proteza se moraju održavati i redovito kontrolirati kod stomatologa te se oralna higijena istih mora održavati najmanje jednom dnevno.

Totalne proteze koje se pričvrste na implantate imaju dvije najčešće tehnike fiksiranja. Prva tehnika je *All on four*, gdje se proteza fiksira na 4 implantata te također postoji vrlo raširena tehnika *All on six*, gdje se proteza fiksira na 6 implantata što pruža još bolju stabilnost same proteze u ustima. Vrlo je bitno da se kod svih vrsta proteza pacijenti pridržavaju uputa o hranjenju i načinu žvakanja koje im objasni stomatolog. Naime kod zubnih proteza izbjegava

se zagrizanje sa prednjim djelom proteze jer to negativno utječe na stabilnost istih. Prijelom proteza je obično klinički problem koji se obično javlja uslijed velikih žvačnih sila ili drugih slučajnih oštećenja prilikom korištenja. Većina prijeloma proteza uzrokovana je kombinacijom umora materijala i jakog udarca, za mandibularne proteze 80% prijeloma uzrokovano je udarcem i uključuje vrlo visoke troškove popravaka. Kod prijeloma proteza bitno je naglasiti i opasnost uslijed slučajnog gutanja djelova proteze ili cijelih proteza što može voditi oštećenjima jednjaka.

Glavni nedostatak PMMA proteza je niska otpornost na lom. Općenito postoje dvije vrste izloženosti mogućnosti prijeloma kod uklonjivih zubnih proteza. Događaje unutar pacijentovih usta možemo razdijeliti na ekstraoralne i intraolarne. Intraolarno djeluju opetovane žvačne sile koje dovode do umora materijala, dok za ekstraoralne utjecaje možemo navesti slučajne padove proteza koji dovode do lomova istih [15].

Dosad se PMMA nastojao poboljšati na različite načine. Kemijski se PMMA nastojao poboljšati kopolimerizacijom sa butadien stirenom što je vodilo do većih vrijednosti udarnog rada loma, ali se uvelike snizila svojnja čvrstoća. Nadalje se PMMA ojačavao metalnim, staklenim, polimernim, ugljičnim i aramidnim vlaknima. Prilikom korištenja metalnih žica kao ojačala vrlo veliki problem je slabo prijanjanje matrice, odnosno akrilata na metalne žice. Kod ojačanja korištenjem polimera, korišteni su različiti polimeri, najčešće su ispitivani poliamid i polietilen. Poliamid se pokazao dobrim kada je u pitanju udarni rad loma, ali njegova negativna karakteristika je tendencija za upijanjem vode, zbog čega degradiraju svojstva proteza izrađenih na takav način. Kod ugljičnih vlakana unaprijedila su se značajno žilavost i čvrstoća ali postoji problem citotoksičnosti ugljičnih vlakana u čovjekovom tijelu, izazivanje iritacije sluznice, visoka cijena i kompleksna tehnologija izrade. Aramidna vlakna su pokazala kao i ugljična vlakna povećanje žilavosti i čvrstoće, ali proteze napravljene od tih vlakana je izuzetno teško polirati i dobiti glatku površinu, također ponekad može doći do problema prijanjanja vlakana i matrice. Staklena vlakna vrlo dobro prijanjaju uz matricu, povećavaju žilavost i čvrstoću, ali bitno je voditi računa o rubovima proteze jer izloženost tih vlakana sluznici uzrokuje iritaciju sluznice. Kod staklenih vlakana velika prednost spram ostalih spomenutih vlakana je niska cijena i široka dostupnost. Najčešće se koriste E staklena vlakna [16]. Osim ojačanja vlaknima, sve više se istražuju zubne proteze koje su ojačane nano česticama. Također navedene nano čestice ne služe samo kao ojačanje već mogu biti djelotvorne protiv određenih uzročnika upale. Primjerice koriste se nano čestice cirkonijeva oksida u PMMA matrici kako bi se smanjila adhezija gljive *Candida Albicans*, vrlo čestog uzročnika upale u korisnika zubnih proteza [17].

### 3. Eksperimentalni dio

Ovaj diplomski rad baziran je na ideji ojačavanja akrilata koji se koristi za zubne proteze, odnosno PMMA sa staklenim vlaknima kako bi se istom poboljšala mehanička svojstva. Mehanička svojstva koja su se ispitivala su: vlačna čvrstoća, žilavost te savojna čvrstoća. Navedena mehanička svojstva ispitivala su se statičkim vlačnim pokusom, udarnim radom loma te pokusom savijanja u tri točke.

Navedena mehanička svojstva ispitivana su u dva ciklusa. U navedena dva ciklusa ispitivale su se tri vrste materijala. Ispitan je materijal bez staklenih ojačala odnosno PMMA hladno polimeriziran, zatim je ispitivan PMMA hladno polimeriziran sa staklenim vlaknima i naposljetku je ispitivan PMMA hladno polimeriziran s impregniranim staklenim vlaknima. Ispitivanja su provedena u dva ciklusa jer prvi ciklus prati norme navedene u tablici 3. za ispitivanje žilavosti, savojne i vlačne čvrstoće, dok drugi ciklus ispitivanja prati navedene norme, ali debljina uzoraka nije iz navedenih normi već je 1,2 mm. Debljina od 1,2 mm je korištena kako bi se ispitivanje približilo zubnim protezama u praksi. Naime većina zubnih proteza koje se koriste imaju u prosjeku tu debljinu, bez obzira na individualizaciju prema pacijentu.

Tablica 3. Norme korištene u prvom ciklusu ispitivanja

Norma	Ispitivanje	Svojstvo
ISO 5274-4:1997	Statički vlačni pokus	Vlačna čvrstoća
ISO 791-1:2000	Udarni rad loma	Žilavost
ISO 178:1993	Savijanje u tri točke / bez ojačala	Savojna čvrstoća
ISO 14125:1998 (E)	Savijanje u tri točke / s ojačalom	Savojna čvrstoća

Prije početka ispitivanja bilo je potrebno odrediti potrebnu količinu epruveta i napraviti uzorke prema dimenzijama navedenim u pojedinoj normi. Svako ispitivanje provelo se na tri epruvete za svaki materijal u oba ciklusa ispitivanja. Redoslijed ispitivanja proveden je na način da je prvo ispitana žilavost, zatim vlačna čvrstoća i naposljetku savojna čvrstoća. U svakom ciklusu ispitivanja izrađene su po tri ploče koje predstavljaju akrilat koji nije ojačan,

akrilat koji je ojačan neimpregniranim staklenim vlaknima i akrilat koji je ojačan impregniranim staklenim vlaknima.

U tablici 4. opisan je prvi ciklus provedenih ispitivanja, navedene su dimenzije epruveta prema normama iz tablice 3. , oznake materijala uzoraka te broj uzoraka.

Tablica 4. Prvi ciklus ispitivanja

Ispitivanje	Oznaka materijala ploče		
	PMMA1	PMMA2	PMMA3
Udarni rad loma	<u>Broj epruveta: 3</u> <u>Dimenzije epruveta:</u> Duljina: 80 mm Širina: 10 mm Debljina: 4 mm	<u>Broj epruveta: 3</u> <u>Dimenzije epruveta:</u> Duljina: 80 mm Širina: 10 mm Debljina: 4 mm	<u>Broj epruveta: 3</u> <u>Dimenzije epruveta:</u> Duljina: 80 mm Širina: 10 mm Debljina: 4 mm
Statički vlačni pokus	<u>Broj epruveta: 3</u> <u>Dimenzije epruveta:</u> Duljina: 150 mm Širina-sredina: 10 mm Širina-krajevi: 20 mm Debljina: 4 mm	<u>Broj epruveta: 3</u> <u>Dimenzije epruveta:</u> Duljina: 150 mm Širina-sredina: 10 mm Širina-krajevi: 20 mm Debljina: 4 mm	<u>Broj epruveta: 3</u> <u>Dimenzije epruveta:</u> Duljina: 150 mm Širina-sredina: 10 mm Širina-krajevi: 20 mm Debljina: 4 mm
Savijanje u tri točke	<u>Broj epruveta: 3</u> <u>Dimenzije epruveta:</u> Duljina: 80 mm Širina: 10 mm Debljina: 4 mm	<u>Broj epruveta: 3</u> <u>Dimenzije epruveta:</u> Duljina: 80 mm Širina: 10 mm Debljina: 4 mm	<u>Broj epruveta: 3</u> <u>Dimenzije epruveta:</u> Duljina: 80 mm Širina: 10 mm Debljina: 4 mm

U prvom ciklusu ispitivanja napravljene su tri ploče. Oznake materijala PMMA 1, 2, 3 označavaju redoslijed kojim su ploče izrađivane, nazivi su dani kako bi lakše bilo pratiti epruvetu i pripadnu ploču iz koje je izrezana. Oznake materijala ploča su sljedeće:

- PMMA 1 označava ploču poli(metil-metakrilata) izrađenu bez ojačanja,
- PMMA 2 označava ploču izrađenu ručnim laminiranjem s neimpregniranim staklenim vlaknima,
- PMMA 3 označava ploču izrađenu ručnim laminiranjem s impregniranim staklenim vlaknima.

U prvom ciklusu ispitivanja bitno je istaknuti debljinu od 4 mm koja je zajednička svim pločama.

U tablici 5. vidljiv je prikaz drugog ciklusa ispitivanja, dan je broj epruveta, oznake materijala te dimenzije epruveta s naglaskom da su uzorci (ploče) bile debljine 1,2 mm.

Tablica 5. Drugi ciklus ispitivanja

Ispitivanje	Oznaka materijala ploče		
	PMMA4	PMMA5	PMMA6
Udarni rad loma	<u>Broj epruveta: 3</u>	<u>Broj epruveta: 3</u>	<u>Broj epruveta: 3</u>
	<u>Dimenzije epruveta:</u>	<u>Dimenzije epruveta:</u>	<u>Dimenzije epruveta:</u>
	Duljina: 80 mm	Duljina: 80 mm	Duljina: 80 mm
	Širina: 10 mm	Širina: 10 mm	Širina: 10 mm
	Debljina: 1,2 mm	Debljina: 1,2 mm	Debljina: 1,2 mm
Statički vlačni pokus	<u>Broj epruveta: 3</u>	<u>Broj epruveta: 3</u>	<u>Broj epruveta: 3</u>
	<u>Dimenzije epruveta:</u>	<u>Dimenzije epruveta:</u>	<u>Dimenzije epruveta:</u>
	Duljina: 150 mm	Duljina: 150 mm	Duljina: 150 mm
	Širina-sredina: 10 mm	Širina-sredina: 10 mm	Širina-sredina: 10 mm
	Širina-krajevi: 20 mm	Širina-krajevi: 20 mm	Širina-krajevi: 20 mm
	Debljina: 1,2 mm	Debljina: 1,2 mm	Debljina: 1,2 mm
Savijanje u tri točke	<u>Broj epruveta: 3</u>	<u>Broj epruveta: 3</u>	<u>Broj epruveta: 3</u>
	<u>Dimenzije epruveta:</u>	<u>Dimenzije epruveta:</u>	<u>Dimenzije epruveta:</u>
	Duljina: 80 mm	Duljina: 80 mm	Duljina: 80 mm
	Širina: 10 mm	Širina: 10 mm	Širina: 10 mm
	Debljina: 1,2 mm	Debljina: 1,2 mm	Debljina: 1,2 mm

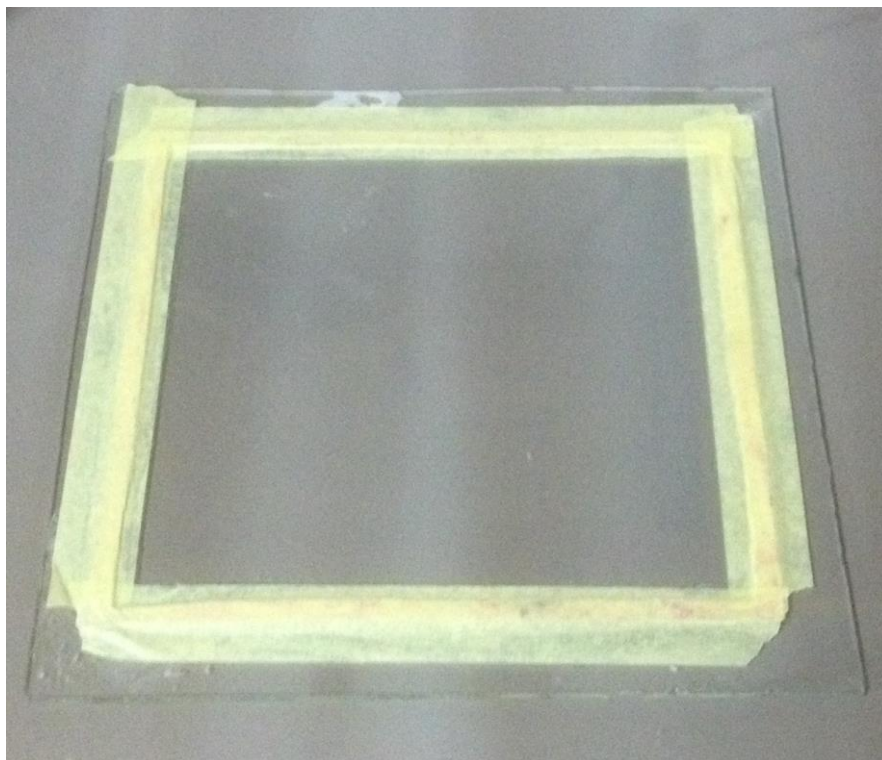
U drugom ciklusu ispitivanja nazivi ploča određeni su analogno prvom ciklusu ispitivanja pa su oznake sljedeće: PMMA 4 predstavlja PMMA bez ojačala, PMMA 5 predstavlja PMMA s neimpregniranim staklenim vlaknima i PMMA 6 predstavlja PMMA s impregniranim staklenim vlaknima.

### 3.1. Izrada uzoraka

Nakon definiranja potrebnog broja ploča i epruveta za svaki ciklus ispitivanja, slijedi odabir laboratorijskog alata i strojeva potrebnih za pripremu uzoraka. Tokom izrade ovog diplomskog rada korišten je hladno polimerizirajući PMMA tvrtke Kulzer trgovačkog naziva MelioDent RR.

#### 3.1.1. Izrada kalupa

Kako bi se navedene ploče u tablicama 4. i 5. najjednostavnije izradile odlučilo se na varijantu izrade staklene baze na koju će se izliti akrilat i drvenog okvira koji će definirati rub i debljinu ploča. Drveni okvir je prekriven krep trakom kako bi se akrilat mogao odvojiti bez da se drveni okvir pomakne. Drveni okvir je izrađen rezanjem i brušenjem kako bi se postigla tražena debljina iz tablice 4. Nakon što je su provjerene dimenzije okvira isti je zalijepljen na staklo. Na slici 6. vidljiv je prikaz prvog kalupa u koji će se izliti akrilat, debljina drvenog okvira je 4 mm.



Slika 6. Drveni okvir na staklenoj podlozi



Prvo je napravljena serija od tri ploče debljine 4 mm (PMMA 1, 2, 3), zatim je napravljena serija od tri ploče debljine 1,2 mm (PMMA 4, 5, 6). Za potrebe svake serije izrade ploča, izrađen je po jedan kalup različitih debljina drvenog okvira.

### 3.1.2. Materijali i pribor za izradu uzoraka

PMMA tvrtke Kulzer nalazi se u dvije odvojene komponente, u prahu i u tekućini. Kako bi se točno odredio omjer miješanja praha i tekućine zadan u uputama korištena je digitalna vaga za određivanje točne količine praha i staklena menzura za određivanje količine tekućine.

Meliudent RR se miješa u omjeru 10 g praha na 7 ml tekućine. Na slici 7. vidljiva je digitalna vaga i proces vaganja praha prije samog miješanja.



Slika 7. Digitalna vaga Scout Pro

Na slici 8. vidljiva je staklena menzura u kojoj je izmjeren točan volumen tekućine i pripadni stakleni štapić koji služi za lakše miješanje praha i tekućine prema uputama proizvođača. Budući da je nakon polimerizacije PMMA vrlo teško odvojiti od zakrivljenih površina, PMMA je pripravljan u jednokratnim plastičnim posudama. Bitno je precizno i točno odrediti potrebnu količinu praha i tekućine jer polimerizacija prema uputama proizvođača nastupa unutar dvije do tri minute [18].



Slika 8. Pribor za miješanje. Staklena menzura – 1, stakleni štapić – 2

### 3.1.3. Materijali za ojačanja

Tokom izrade ovog diplomskog rada istraživao je utjecaj impregniranih staklenih i neimpregniranih staklenih vlakana na mehanička svojstva materijala. Uspoređen je ojačani akrilat u obje varijante sa akrilatom bez ojačala. Staklena vlakna koja nisu impregnirana korštena su za ploče PMMA 2 i PMMA 4 su staklena vlakna trgovačkog naziva Kelteks 160. Na slici 9. Vidljiva su Kelteks 160 staklena vlakna. Impregnirana staklena vlakna se ne razlikuju bitno po izgledu od neimpregniranih, razlika se vidi u rukovanju. Impregnirana vlakna su značajno kruća od tkanine koja nije impregnirana.



Slika 9. Staklena vlakna Kelteks 160 [19]

### 3.1.4. Izrada uzoraka od akrilata bez ojačala

Prva komponenta, odnosno prah Meliodent se sastoji uglavnom od kopolimera metil-metakrilata, dok se druga komponenta odnosno tekućina sastoji od metil-metakrilata i dimetakrilata.

Nakon izrade kalupa, računanja potrebne količine praha i tekućine, izrađena je prva ploča PMMA 1 bez ojačala, debljine 4 mm prema normi navedenoj u tablici 3. Prah i tekućinu je potrebno jako brzo promiješati i uliti u kalup prije nego što nastupi polimerizacija.

Na slici 10. vidljivo je miješanje navedenog praha i tekućine.



Slika 10. Miješanje MelioDent praha i tekućine

Prilikom izrade ploča korištene su zaštitne maske budući da tekućina, odnosno monomer MMA ima intenzivan miris i djeluje iritabilno na respiratorni sustav.



Na sljedećoj slici 11. ilustrirano je izlivanje PMMA u prvi kalup.



Slika 11. Ulijevanje PMMA u prvi kalup

Nakon što je PMMA uliven u prvi kalup, isti se osigurava dodatnim staklom kojim se prekrije drveni okvir i na njega se postave utezi kako bi se dobio što bolji raspored PMMA unutar kalupa. Također navedeno se koristi kako bi se istisnuli eventualni mjehurići zraka u PMMA pločama. Ploča PMMA 1 osigurana pokrovnim staklom i utezima prikazana je na slici 12.

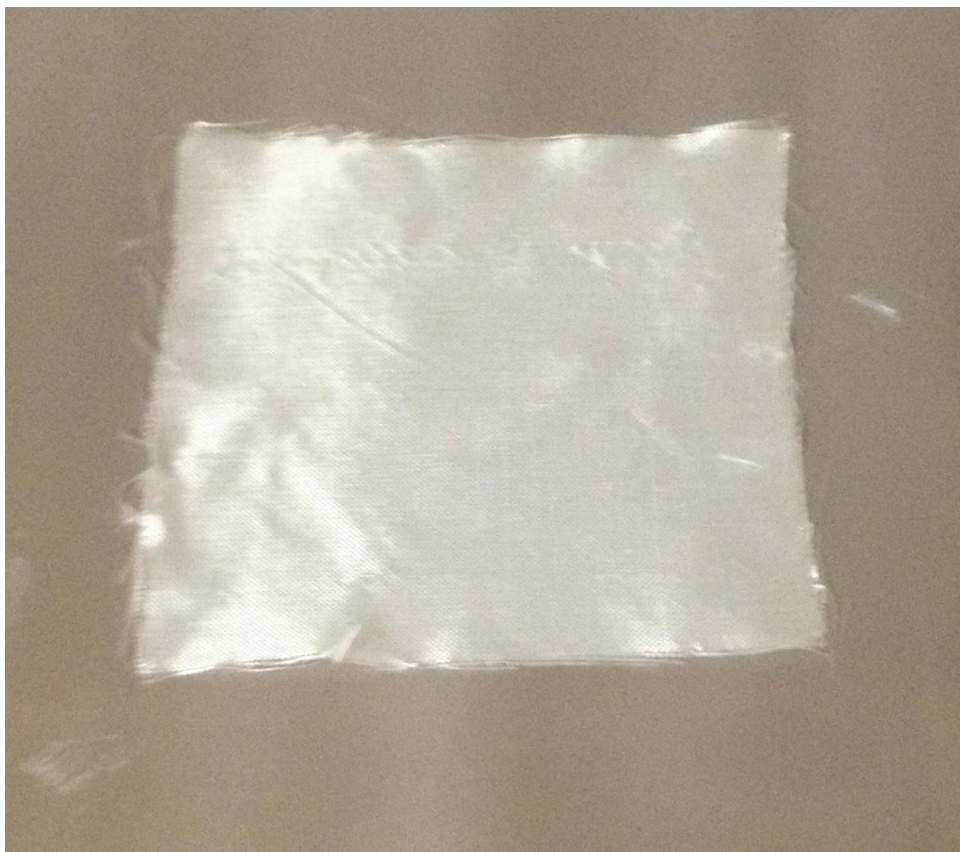


Slika 12. Ploča PMMA 1 s pokrovnim staklom i utezima

### **3.1.5. Izrada uzoraka od akrilata s neimpregniranim ojačalom**

Proces izrade PMMA 2 ploče u suštini je analogan procesu izrade PMMA 1 ploče. Jedina razlika je faza krojenja staklenih vlakana prema kalupu i njihovo umetanje u kalup. Prilikom izrade ploča korišten je jedan sloj neimpregniranih staklenih vlakana.

Na slici 13. vidljiva su neimpregnirana staklena vlakna izrezana na dimenzije kalupa.



Slika 13. Neimpregnirana staklena vlakna

Prilikom izrade ploče PMMA 2 u kalup je uliven dio PMMA na koji su tada stavljena staklena vlakna i zaglađena špatulom. Nakon zaglađivanja na staklena vlakna je izliven ostatak PMMA potreban za ploču PMMA 2 i postavljeno je pokrovno staklo zajedno s utezima. Ovaj način ulijevanja zahtijevao je veliku vještinu i brzinu tehničara jer polimerizacija nastupa unutar dvije minute od miješanja. Također bitno je postići što ravnomjerniji raspored ojačala u PMMA matrice i istisnuti mjehuriće zraka. Na slici 14. vidljiv je uliven PMMA s neimpregniranim ojačalom i pripadni proces zaglađivanja i istiskivanja zraka. Na slici 15. vidljivo je ulijevanje ostatka PMMA.





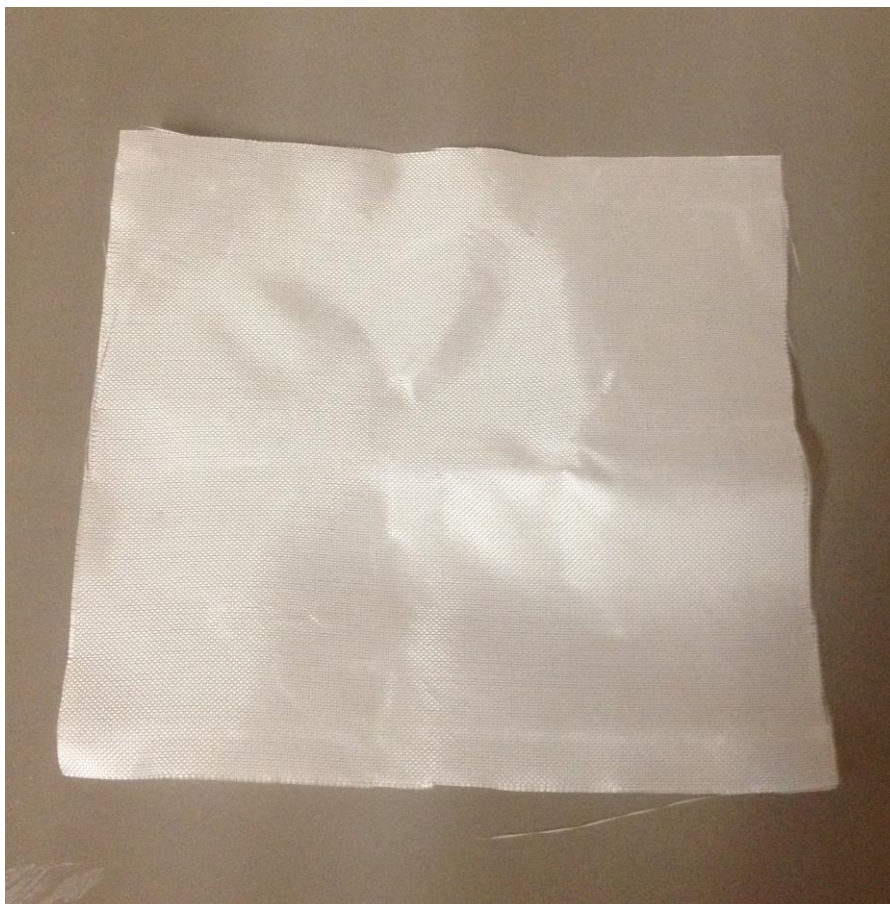
Slika 14. Zaglađivanje staklenih vlakana ploče PMMA 2



Slika 15. Ulijevanje ostatka materijala za ploču PMMA 2

### 3.1.6. Izrada uzoraka od akrilata s impregniranim ojačalom

Postupak izrade ploče debljine 4 mm s impregniranim staklenim vlaknima, odnosno ploče PMMA 3 je isti kao postupak za izradu ploče PMMA 2. Razlika je samo u vrsti korištenih staklenih vlakana. Prilikom izrade ploča korišten je jedan sloj impregniranih staklenih vlakana. Na slici 16. vidljiva su impregnirana staklena vlakna.



Slika 16. Impregnirana staklena vlakna

Navedena impregnirana staklena vlakna su izrezana na potrebne dimenzije kalupa. Kao i za ploču PMMA 2 prvo se ulio jedan dio PMMA, na koji su zatim položena impregnirana staklena vlakna. Nakon što su impregnirana staklena vlakna zaglađena, uliven je ostatak PMMA te je cijeli kalup poklopljen pokrovnim staklom i utezima. Rukovanje s impregniranim staklenim vlaknima bilo je lakše od rukovanja s neimpregniranim staklenim vlaknima. Razlog tome je što se impregnirana staklena odlikuju većom krutosti od neimpregniranih staklenih vlakana. Impregnirana staklena vlakna su također u manjoj mjeri podložna nabiranju te je proces zaglađivanja sa špatulom izveden brže i jednostavnije nego u neimpregniranih staklenih vlakana.

Na slici 17. vidljiva je ploča PMMA 3 nakon što je izvađena iz kalupa. Polimerizacija MelioDenta nastupi nakon 2 do 3 minute. Svaka ploča je ostavljena u svom kalupu dva sata, tek nakon tog vremena kada se polimerizacija odvije do kraja, pristupilo se sljedećem koraku, odnosno rezanju prikladnih epruveta.

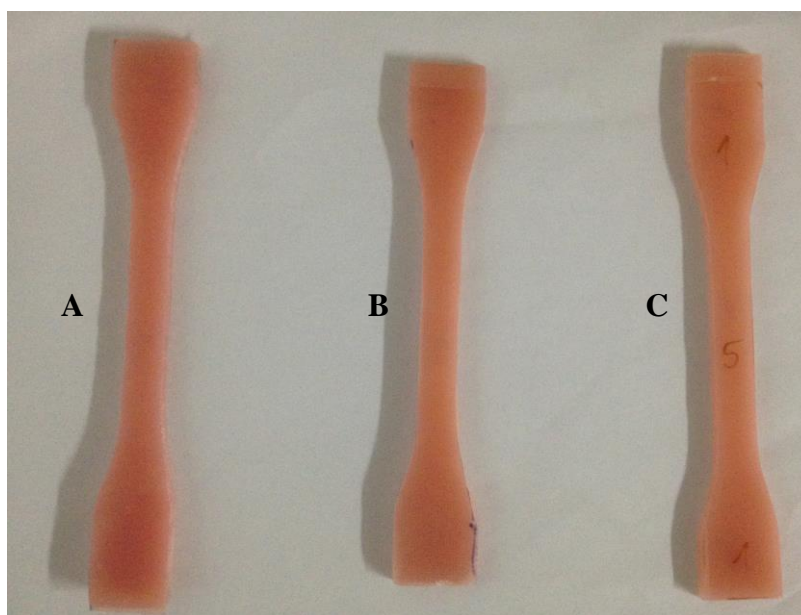


Slika 17. Ploča PMMA 3 izvan kalupa

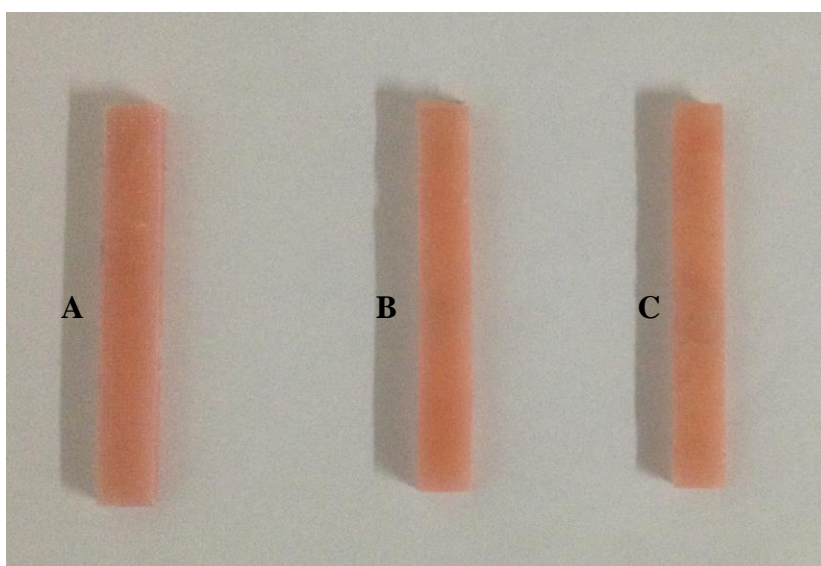
Nakon što su napravljene ploče PMMA 1, PMMA 2 i PMMA 3, pristupilo se izradi ploča PMMA 4, PMMA 5, PMMA 6. Na početku samog eksperimentalnog rada uz kalup s debljinom okvira 4 mm izrađen je i kalup s debljinom okvira 1,2 mm. Ploča PMMA 4, odnosno ploča debljine 1,2 mm bez ojačala izrađena je na način analogan ploči PMMA 1. Jednako tako su ploče PMMA 5 i PMMA 6, odnosno ploče debljine 1,2 mm s neimpregniranim i impregniranim ojačalom izrađene analogno pločama PMMA 2 i PMMA 3. Norme navedene u tablici 3. definiraju točne dimenzije epruveta za pojedino ispitivanje. Rezanje uzoraka provedeno je na preciznom ručnom alatu s rotacijskim nožem. Prije samog rezanja na površini ploča zacrtane su točne dimenzije epruveta. Sa svake ploče izrezano je 9 epruveta, od toga tri epruvete za statički vlačni pokus, tri epruvete za udarni rad loma i tri epruvete za savijanje u tri točke. Dimenzije epruveta za pokus savijanja u tri točke su jednake što je olakšalo postupak rezanja. Epruveta za statički vlačni pokus je složenijeg oblika i zahtijevala je veću vještinu tehničara kako bi se izradio radijus kod glave epruvete. Nakon što su epruvete izrezane, iste su brušene prije samog ispitivanja na zahtjeve normi koji su



navedeni u tablicama 4. i 5. Prilikom brušenja bilo je teže obraditi epruvete sa ploča PMMA 4, PMMA 5 i PMMA 6 zbog velike savitljivosti epruveta pri debljini 1,2 mm. Na slikama 18. i 19. prikazan je izgled epruveta izrezanih s ploča PMMA 1, PMMA 2 i PMMA 3 za prvi ciklus ispitivanja. Na slici 18. vidljiv je prikaz epruveta za statički vlačni pokus za prvi ciklus ispitivanja. Na slici 19. vidljiv je prikaz epruveta za ispitivanje udarnog rada loma i savijanja u tri točke za prvi ciklus ispitivanja.

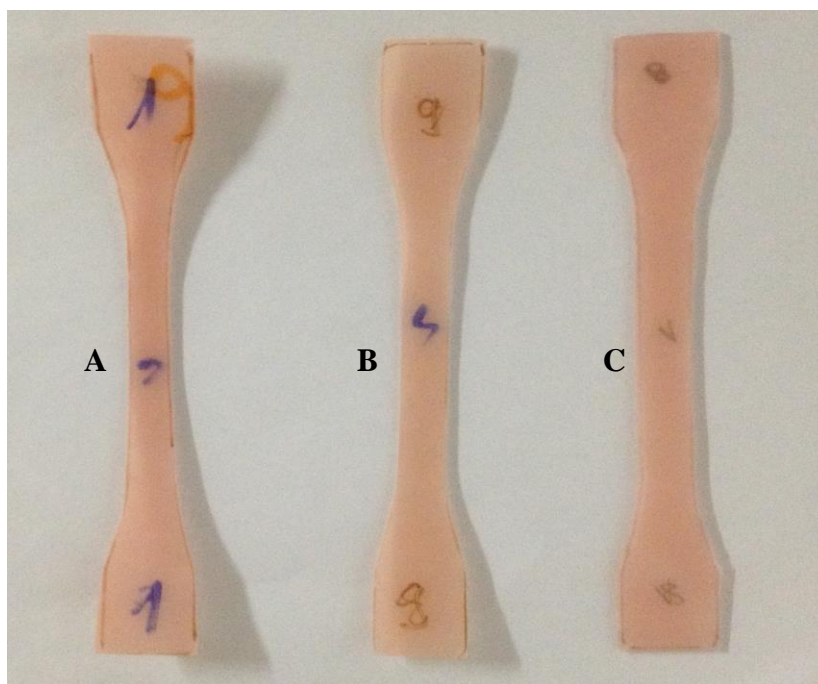


Slika 18. Epruvete za statički vlačni pokus – prvi ciklus ispitivanja. Epruveta ploče PMMA 1 - A, epruveta ploče PMMA 2 – B, epruveta ploče PMMA 3 – C

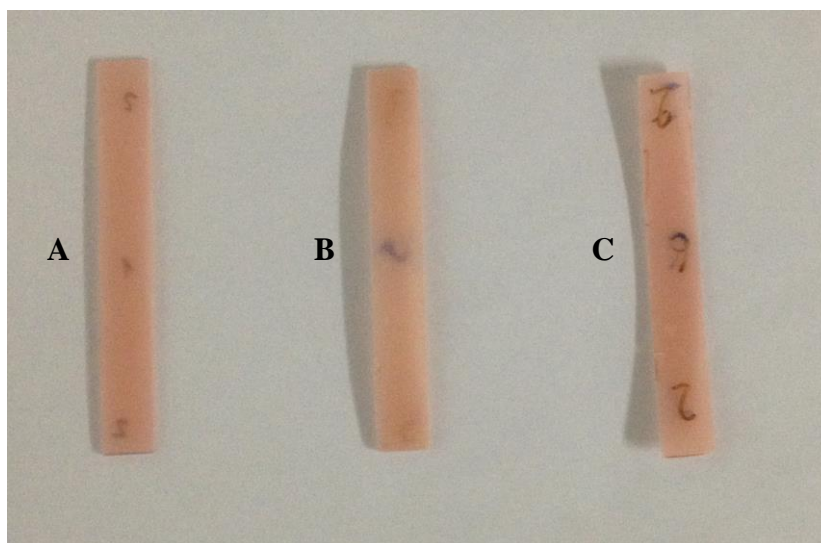


Slika 19. Epruvete za prvi ciklus ispitivanja savijanja u tri točke i udarnog rada loma. Epruveta ploče PMMA 1 - A, epruveta ploče PMMA 2 – B, epruveta ploče PMMA 3 – C

Dimenzije epruveta za ispitivanje žilavosti i savojne čvrstoće prema normama u tablici 3. su iste. Nakon što su izrezane ploče za prvi ciklus ispitivanja, izrezane su epruvete za drugi ciklus ispitivanja prema dimenzijama navedenim u tablici 5. Na slici 20. prikazane su epruvete za statički vlačni pokus za drugi ciklus ispitivanja. Na slici 21. prikazane su epruvete za ispitivanje udarnog rada loma i savijanja u tri točke za drugi ciklus ispitivanja.



Slika 20. Epruvete za statički vlačni pokus – drugi ciklus ispitivanja. Epruveta ploče PMMA 4 - A, epruveta ploče PMMA 5 – B, epruveta ploče PMMA 6 – C



Slika 21. Epruvete za drugi ciklus ispitivanja savijanja u tri točke i udarnog rada loma. Epruveta ploče PMMA 4 - A, epruveta ploče PMMA 5 – B, epruveta ploče PMMA 6 – C

### 3.2. Ispitivanje mehaničkih svojstava

#### 3.2.1. Udarni rad loma

Ispitivanje udarnog rada loma opisuje žilavost, odnosno krhkost materijala. Za ispitivanje udarnog rada loma korišten je Charpy-jev bat. Epruvete za ispitivanje udarnog rada loma mogu biti sa zarezom i bez zareza. Bat se preko sustava poluga pusti te isti udari u ispitni uzorak odnosno epruvetu. PMMA pripada skupini krhkih materijala te epruvete izrađene od PMMA pucaju bez korištenja zareza. Charpy-jev bat ukazuje na energiju potrebnu da dođe do loma epruvete [7]. Na slici 22. vidljiv je Charpy-jev bat na kojem se provodio pokus udarnog rada loma.



Slika 22. Charpy-jev bat

Prije samog pokusa bilo je potrebno izmjeriti dimenzije epruveta, da se provjeri jesu li uzorci izrađeni u skladu s normom o ispitivanju žilavosti navedenom u tablici 3. Dimenzije epruveta koje definira norma za ispitivanje žilavosti navedene su u tablici 6. Dimenzije epruveta mjerene su pomičnim mjerilom s rezolucijom 0,02 mm. Izmjerena je širina (b) i debljina (h) svake epruvete za oba ciklusa ispitivanja. Dimenzije za drugi ciklus ispitivanja žilavosti na epruvetama debljine 1,2 mm navedene su u tablici 7.

Tablica 6. Dimenzije epruveta za prvi ciklus ispitivanja udarnog rada loma

Prvi ciklus ispitivanja						
Broj epruvete	Ploča					
	PMMA 1		PMMA 2		PMMA 3	
	Dimenzije epruveta		Dimenzije epruveta		Dimenzije epruveta	
	Širina (b)	Debljina (h)	Širina (b)	Debljina (h)	Širina (b)	Debljina (h)
1	10,02	4,20	10,12	4,16	10,00	4,10
2	10,12	4,12	10,24	4,10	10,16	4,22
3	10,04	4,00	10,30	4,18	10,08	4,18

Tablica 7. Dimenzije epruveta za drugi ciklus ispitivanja udarnog rada loma

Drugi ciklus ispitivanja						
Broj epruvete	Ploča					
	PMMA 4		PMMA 5		PMMA 6	
	Dimenzije epruveta		Dimenzije epruveta		Dimenzije epruveta	
	Širina (b)	Debljina (h)	Širina (b)	Debljina (h)	Širina (b)	Debljina (h)
1	10,22	1,24	10,08	1,30	10,20	1,22
2	10,32	1,20	10,00	1,28	10,28	1,22
3	10,38	1,18	10,18	1,22	10,40	1,28



Budući da su provedena dva ciklusa ispitivanja na uzorcima različite debljine i ojačanja, tokom ispitivanja bilo je potrebno promijeniti primarni bat, s ciljem korištenja preciznije skale. Za ispitivanje su korištena dva bata, bat od 5 „kpcm“ te bat od 10 „kpcm“. Za prvi bat je korištena mjerna skala 5 „kpcm“, dok je za drugi bat korištena mjerna skala 40 „kpcm“. 1 „kpcm“ odgovara otprilike 0,49 J nakon preračunavanja. Sukladno normi za ispitivanje žilavosti bilo je potrebno odrediti razmak između oslonaca na Charpy-jevom batu. Na slici 23. vidljivo je pozicioniranje epruvete na osloncima.



Slika 23. Pozicioniranje uzorka za Charpy-jev bat – prvi ciklus ispitivanja

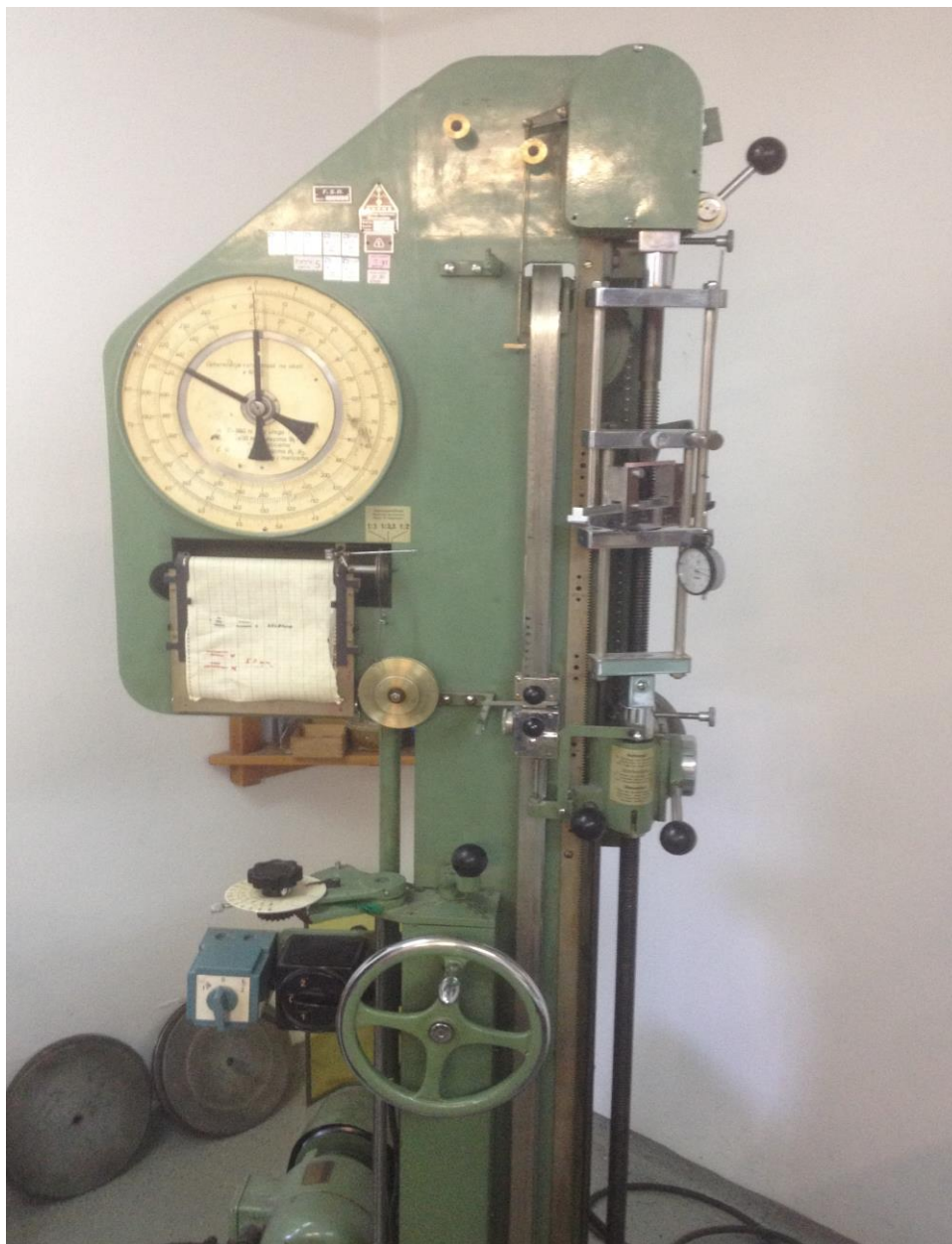
Na epruvetama iz tablice 7. za drugi ciklus ispitivanja bilo je potrebno napraviti urez jer zbog svoje debljine od 1,2 mm nisu pucale, već bi iste ispale iz oslonaca na Charpy-jevom batu. Na slici 24. vidljiva je epruveta sa urezom.



Slika 24. Pozicioniranje uzorka za Charpy-jev bat – drugi ciklus ispitivanja

### 3.2.2. Savijanje u tri točke

Pokus savijanja u tri točke i statički vlačni pokus su izvedeni na istom uređaju, odnosno univerzalnoj kidalici VEB Thüringer Industriewerk koja je prikazana na slici 25. Ispitivanje savijanja u tri točke, provedeno je s ciljem određivanja savojne čvrstoće za pojedinu epruvetu. U ispitivanju savijanja u tri točke odredit će se maksimalna sila za svaku epruvetu te će se izračunati pripadna savojna čvrstoća.



Slika 25. Univerzalna kidalica VEB Thüringer Industriewerk

Prije početka ispitivanja izmjerene su dimenzije epruveta za oba ciklusa ispitivanja. Dimenzije epruveta za prvi ciklus ispitivanja nalaze su u tablici 9. Pomičnim mjerilom rezolucije 0,02 mm izmjereni su širina epruvete –  $b$  i debljina epruvete –  $h$ .

Tablica 8. Dimenzije epruveta za prvi ciklus ispitivanja savijanja u tri točke

Prvi ciklus ispitivanja						
Broj epruvete	Ploča					
	PMMA 1		PMMA 2		PMMA 3	
	Dimenzije epruveta		Dimenzije epruveta		Dimenzije epruveta	
	Širina (b)	Debljina (h)	Širina (b)	Debljina (h)	Širina (b)	Debljina (h)
4	10,32	4,38	10,10	4,18	10,06	4,12
5	10,20	4,44	10,22	4,12	10,12	4,24
6	10,12	4,40	10,00	4,20	10,04	4,12

Tablica 9. Dimenzije epruveta za drugi ciklus ispitivanja savijanja u tri točke

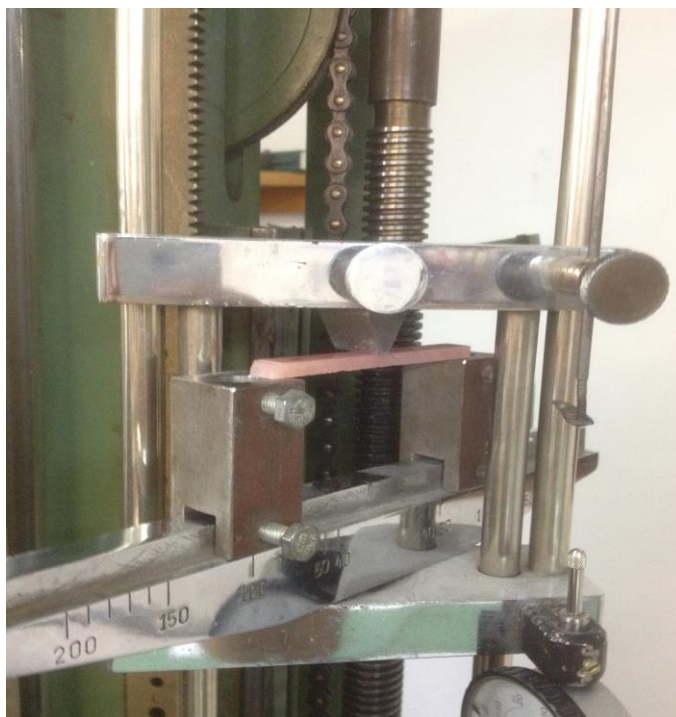
Drugi ciklus ispitivanja						
Broj epruvete	Ploča					
	PMMA 4		PMMA 5		PMMA 6	
	Dimenzije epruveta		Dimenzije epruveta		Dimenzije epruveta	
	Širina (b)	Debljina (h)	Širina (b)	Debljina (h)	Širina (b)	Debljina (h)
4	10,08	1,28	10,32	1,32	10,40	1,16
5	10,14	1,24	10,22	1,22	10,38	1,22
6	10,10	1,20	10,08	1,20	10,28	1,34

Nakon što su izmjerene epruvete za pokus savijanja u tri točke, za prvi ciklus ispitivanja podešen je razmak između oslonaca prema normi navedenoj u tablici 3. na  $L_1=64$  mm. Za drugi ciklus ispitivanja izračunat je razmak između oslonaca prema izrazu 1.1.

$$L_2=(16\pm1)h_s. \quad (1.1.)$$

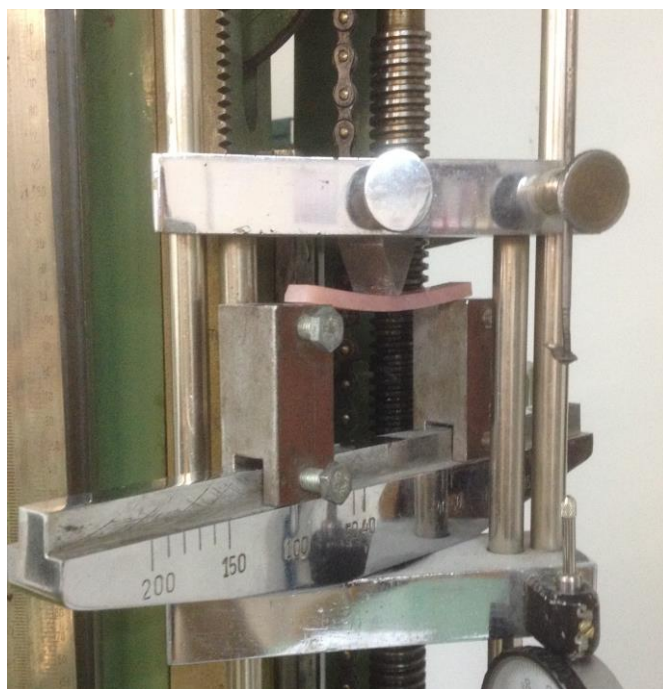
Nakon uvrštavanja numeričkih vrijednosti u izraz 1.1. za sve tri epruvete drugog ciklusa ispitivanja dobije se vrijednost razmaka između oslonaca  $L_2=20$  mm.

Nakon što je određen razmak između oslonaca za oba ciklusa ispitivanja, podešeni su oslonci i čeljust za ispitivanje savijanja u tri točke. Na slici 26. vidljiv je prikaz pozicionirane epruvete između dva oslonca za prvi ciklus ispitivanja.



Slika 26. Pozicioniranje epruvete za ispitivanje savijanja u tri točke

Na slici 27. vidljiv je postupak ispitivanja epruvete na savijanje u tri točke. Prilikom ispitivanja savijanja u tri točke dolazi do karakterističnog progiba epruvete koji prati oblik parabole. Brzina ispitivanja tokom prvog i drugog ciklusa ispitivanja iznosila je 5 mm/min.



Slika 27. Prkaz tijekom ispitivanja savijanja u tri točke



### 3.2.3. Statički vlačni pokus

Statički vlačni pokus jedan je od najčešćih pokusa prilikom ispitivanja mehaničkih svojstava materijala. Statički vlačni pokus temelji se na mjerenju produljenja, odnosno deformacije epruvete pri konstantnom porastu sile. Prilikom ispitivanja za preciznije mjerenje produljenja mogu se koristiti ekstenziometri. Statički vlačni pokus proveden je na istom uređaju kao i ispitivanje savijanja u tri točke, odnosno na univerzalnoj kladenci VEB Thüringer Industriewerk. Razlika spram ispitivanja u tri točke je u korištenju drugih priteznih čeljusti koje omogućuju vlačno opterećenje epruveta. Prije samog ispitivanja bilo je potrebno odrediti dimenzije epruvete za statički vlačni pokus, odnosno širinu epruvete –  $b$  i debljinu epruvete –  $h$ . Analogno ispitivanju savijanja u tri točke i ispitivanju žilavosti, kod statičkog vlačnog pokusa je također korišteno pomično mjerilo rezolucije 0,02 mm. Dimenzije  $b$  i  $h$  su mjerene na sredini svake epruvete. Rezultati mjerenja epruveta za statički vlačni pokus za prvi ciklus ispitivanja nalaze se u tablici 10.

Tablica 10. Dimenzije epruveta za prvi ciklus ispitivanja statičkog vlačnog pokusa

Prvi ciklus ispitivanja						
Broj epruvete	Ploča					
	PMMA 1		PMMA 2		PMMA 3	
	Dimenzije epruveta		Dimenzije epruveta		Dimenzije epruveta	
	Širina ( $b$ )	Debljina ( $h$ )	Širina ( $b$ )	Debljina ( $h$ )	Širina ( $b$ )	Debljina ( $h$ )
7	10,30	4,32	10,18	4,28	10,36	4,22
8	10,38	4,34	10,02	4,32	10,32	4,14
9	10,34	4,30	10,20	4,04	10,14	4,32

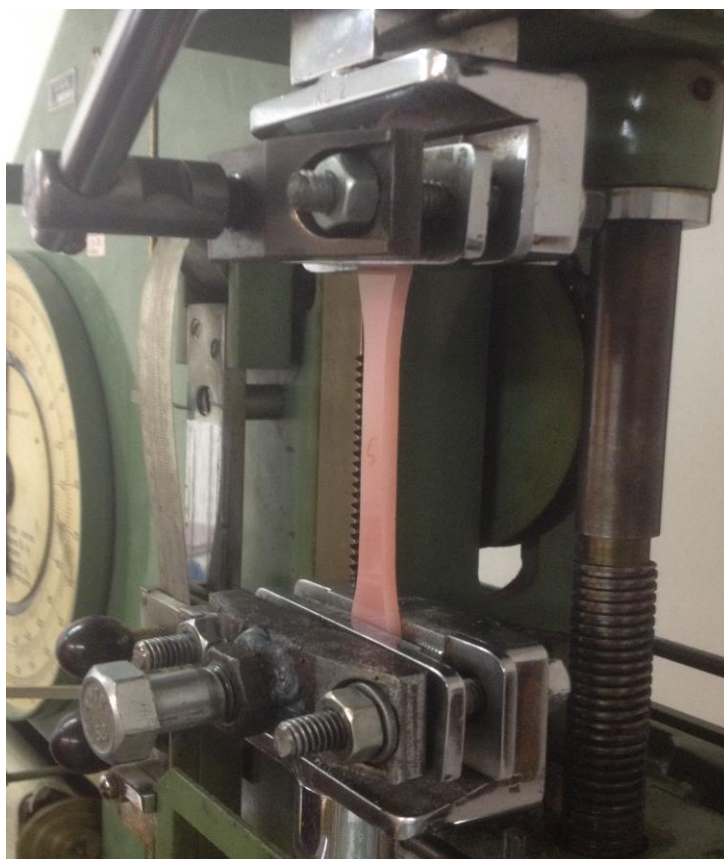
Kod prvog ciklusa ispitivanja korištena je mjerna skala od 0 N do 2400 N. Kod drugog ciklusa ispitivanja korištena je ista skala kao za prvi ciklus kod svih uzoraka osim kod ploče PMMA 4. Naime ploča PMMA 4 je debljine 1,2 mm i nije ojačana te je korištena mjerna skala od 0 N do 950 N kako bi dobiveni rezultati bili što precizniji.

Rezultati mjerenja dimenzija epruveta za drugi ciklus statičkog vlačnog pokusa dani su u tablici 11.

Tablica 11. Dimenzije epruveta za drugi ciklus ispitivanja statičkog vlačnog pokusa

Drugi ciklus ispitivanja						
Broj epruvete	Ploča					
	PMMA 4		PMMA 5		PMMA 6	
	Dimenzije epruveta		Dimenzije epruveta		Dimenzije epruveta	
	Širina (b)	Debljina (h)	Širina (b)	Debljina (h)	Širina (b)	Debljina (h)
7	10,24	1,20	10,26	1,30	10,42	1,18
8	10,26	1,22	10,24	1,18	10,28	1,20
9	10,14	1,22	10,12	1,22	10,30	1,30

Nakon mjerenja svih epruveta uzorci su pozicionirani i stegnuti u čeljusti stroja namijenjenih za statički vlačni pokus. Na slici 28. vidljiva je stegnuta epruveta za prvi ciklus ispitivanja za statički vlačni pokus.



Slika 28. Prikaz stegnute epruvete za prvi ciklus ispitivanja statičkog vlačnog pokusa

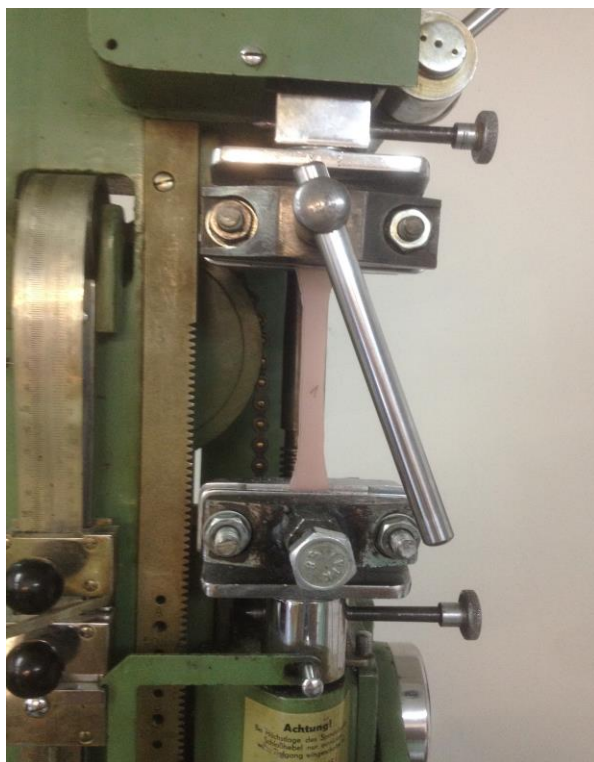
Ispitivanje se provodi, odnosno epruveta se konstantno vlačno opterećuje sve dok ne dođe do loma epruvete. Na slici 29. prikazan je lom epruvete. Ovdje se može primijetiti kako se dva djela epruvete pri statičkom vlačnom pokusu potpuno odvoje makar su ojačana što nije slučaj kod ispitivanja savijanja u tri točke. Naime kod loma neojačanih epruveta (ploče PMMA 1 i PMMA 4), prilikom ispitivanja savijanja u tri točke dođe do potpunog odvajanja dva slomljena djela epruvete. Druge uzorke kod ispitivanja savijanja u tri točke karakterizira povezanost dva djela slomljene epruvete, povezani su korištenim ojačalom.



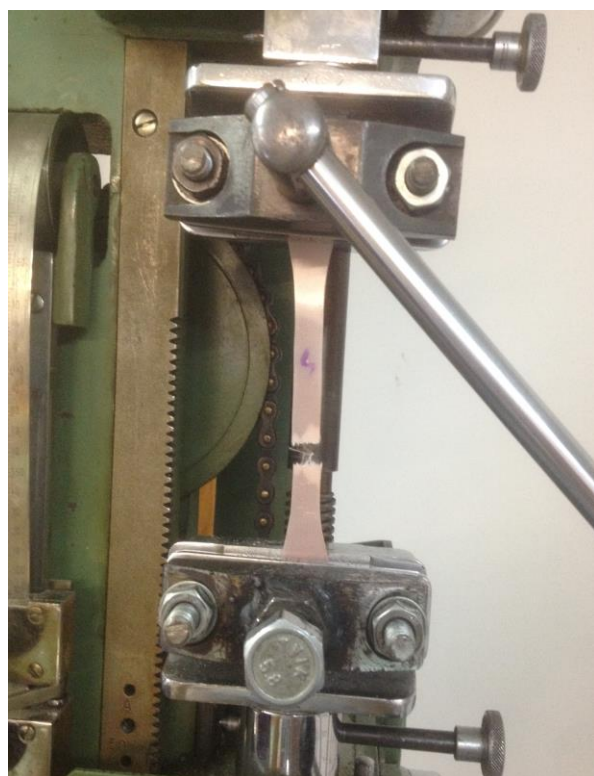
Slika 29. Lom epruvete u prvom ciklusu ispitivanja statičkog vlačnog pokusa

Epruveta je puknula gotovo na sredini. Navedeno ukazuje na ispravnu pripremu uzoraka, primjerice tokom brušenja i rezanja dobro su praćene dimenzije epruveta s velikim naglaskom na precizno oblikovanje radijusa epruvete te nije došlo do grešaka uslijed rukovanja alatima. Uzorak nije puknuo u čeljusti što ukazuje na dobru strukturu materijala uzoraka bez poroznosti i nepravilnosti. Također ovakav lom epruvete je znak ispravnog pritezanja i pozicioniranja uzoraka.

Na slici 30. prikazano je pozicioniranje epruvete za drugi ciklus ispitivanja. Na slici 31. prikazan je lom epruvete s ojačalom u drugom ciklusu ispitivanja. Kod ovog ciklusa ispitivanja naglasak je bio na ispravnom pritezanju uzoraka zbog njihove debljine od 1,2 mm.



Slika 30. Pozicioniranje epruvete u drugom ciklusu ispitivanja statičkog vlačnog pokusa



Slika 31. Lom epruvete u drugom ciklusu ispitivanja statičkog vlačnog pokusa

## 4. Rezultati

### 4.1. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma

Žilavost je ispitana pokusom udarnog rada loma. Vrijednosti udarnog rada loma su očitavane na mjernoj skali u „kpcm“, odnosno umnožak kiliponda i centimentra. Navedena mjerna jedinica se više ne koristi te su rezultati preračunati i obrađeni u J (džul), odnosno u izvedenu mjernu jedinicu SI sustava za energiju. Rezultati su obrađeni na način da je izračunata srednja vrijednost udarnog rada loma  $\bar{x}$  i pripadna standardna devijacija  $\sigma_x$ , odnosno srednje odstupanje od aritmetičke sredine. U tablici 12. dani su rezultati udarnog rada loma za prvi ciklus ispitivanja.

Tablica 12. Rezultati udarnog rada loma za prvi ciklus ispitivanja

Prvi ciklus ispitivanja			
Broj epruvete	Ploča		
	PMMA 1	PMMA 2	PMMA 3
	Udarni rad loma (J)	Udarni rad loma (J)	Udarni rad loma (J)
1	0,140	0,720	0,750
2	0,135	0,400	0,680
3	0,190	0,550	0,700
$\bar{x}$	<b>0,155</b>	<b>0,557</b>	<b>0,713</b>
$\sigma_x$	0,018	0,092	0,020

Iz rezultata navedenih u tablici 10. može se zaključiti kako vrijednost udarnog rada loma raste s korištenjem ojačala. Ploča PMMA 1 nije ojačana s staklenim vlaknima i pokazuje najmanje rezultate na ovom ispitivanju. Niža vrijednost udarnog rada loma je karakteristika krhkih materijala dok su više vrijednosti udarnog rada loma karakteristika žilavih materijala. Za ispitivanje PMMA 2 i PMMA 3 korišten je bat od 10 „kpcm“ jer pri korištenju bata od 5 „kpcm“ kao kod PMMA 1 uzorci nisu pucali. Rezultati udarnog rada loma ploče PMMA 3 su

najviši te se može zaključiti kako se korištenjem staklenih vlakana uvelike povećava žilavost, pogotovo korištenjem impregniranih staklenih vlakana.

Drugi ciklus ispitivanja udarnog rada loma je proveden analogno prvom ciklusu ispitivanja. Za ploče PMMA 4, PMMA 5 i PMMA 6 izračunate su srednje vrijednosti i standardna devijacija udarnog rada loma. Rezultati za drugi ciklus ispitivanja prikazani su u tablici 13. Pri ispitivanju epruveta u drugom ciklusu ispitivanja korišten je bat od 5 „kpcm“ kako bi se koristila preciznija mjerna skala.

Tablica 13. Rezultati udarnog rada loma za drugi ciklus ispitivanja

Drugi ciklus ispitivanja			
Broj epruvete	Ploča		
	PMMA 4	PMMA 5	PMMA 6
	Udarni rad loma (J)	Udarni rad loma (J)	Udarni rad loma (J)
1	0,015	0,225	0,440
2	0,019	0,239	0,310
3	0,023	0,223	0,310
$\bar{x}$	<b>0,019</b>	<b>0,229</b>	<b>0,353</b>
$\sigma_x$	0,004	0,009	0,075

Kod drugog ciklusa ispitivanja bitno je napomenuti da su epruvete zarezane. Urez je napravljen zbog debljine epruveta od 1,2 mm. Naime zbog male debljine epruvete nisu pucale već bi samo ispadale iz oslonaca na Charpy-evom batu. Nakon što su provedena ispitivanja u drugom ciklusu ispitivanja, iz rezultata u tablici 11. može se zaključiti kako opet najmanju vrijednost udarnog rada loma ima ploča PMMA 4 bez ojačanja. Udarni rad loma raste dodavanjem ojačala, odnosno staklenih vlakana te je najviši za impregnirana staklena vlakna. Nakon oba ciklusa ispitivanja može se zaključiti kako se udarni rad loma smanjuje u korelaciji sa smanjivanjem poprečnog presjeka, odnosno debljine epruvete  $h$  u ovom slučaju. Također vrijedi i suprotna relacija, odnosno udarni rad loma raste s povećanjem debljine epruvete  $h$ .



#### 4.2. Rezultati ispitivanja savijanja u tri točke

Nakon što su epruvete izmjerene, iste su ispitane na univerzalnoj kidalici. Prije samog ispitivanja kod svih epruveta izmjerene su njihove dimenzije te je oslonac postavljen na razmak definiran normom u tablici 3. Također istom normom definiran je izraz savojne čvrstoće  $R_{m_s}$ .

$$R_{m_s} = \frac{3 \cdot F_{maks} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (1.2.)$$

U oba ciklusa ispitivanja izmjerena je maksimalna sila  $F_{maks}$  (N) te je putem izraza 1.2. izračunata vrijednost savojne čvrstoće. Kod rezultata je kao i kod ispitivanja žilavosti uzeta u obzir aritmetička sredina rezultata maksimalne sile i savojne čvrstoće te standardna devijacija za svaku ploču. Rezultati prvog ciklusa ispitivanja savijanja u tri točke dani su u tablici 14.

Tablica 14. Rezultati ispitivanja savijanja u tri točke za prvi ciklus ispitivanja

Prvi ciklus ispitivanja						
Broj epruvete	Ploča					
	PMMA 1		PMMA 2		PMMA 3	
	$F_{maks}$ (N)	$R_{m_s}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_{maks}$ (N)	$R_{m_s}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_{maks}$ (N)	$R_{m_s}$ (N/mm <sup>2</sup> )
4	122	59,16	178	96,83	196	110,19
5	98	46,79	172	95,18	241	127,17
6	128	62,72	192	104,49	222	125,05
$\bar{x}$	<b>116,00</b>	<b>56,22</b>	<b>180,67</b>	<b>98,83</b>	<b>219,70</b>	<b>120,80</b>
$\sigma_x$	15,87	8,36	10,26	4,97	22,60	9,25

Iz rezultata za prvi ciklus ispitivanja savijanja u tri točke možemo zaključiti kako upotreba ojačala povećava savojnu čvrstoću. Najveća vrijednost savojne čvrstoće je kod ploče PMMA 3 koja je ojačana impregniranim staklenim vlaknima. Najmanja vrijednost savojne čvrstoće pojedine epruvete zabilježena je kod ploče PMMA 1 koja nije ojačana. Također bilo je moguće primijetiti razlike u lomovima pojedinih epruveta te su tako epruvete ploče PMMA 1 karakterizirane krhkim lomom, epruvete su puknule na dva djela. Kod ploče PMMA 2 oba

odlomljena djela držala su se zajedno na ojačalu koje je korišteno, dok su epruvete ploče PMMA 3 pokazale odvajanje jednog sloja akrilata od ojačala u području loma.

Za drugi ciklus ispitivanja bilo je potrebno osim mjerenja epruveta, definirati razmak između oslonaca prema izrazu 1.1. Nakon što je definiran razmak između oslonaca pristupilo se drugom ciklusu ispitivanja savijanja u tri točke ploča PMMA 4, PMMA 5 i PMMA 6. Rezultati drugog ciklusa ispitivanja savijanja u tri točke dani su u tablici 15.

Tablica 15. Rezultati ispitivanja savijanja u tri točke za drugi ciklus ispitivanja

Drugi ciklus ispitivanja						
Broj epruvete	Ploča					
	PMMA 4		PMMA 5		PMMA 6	
	$F_{maks}$ (N)	$Rm_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_{maks}$ (N)	$Rm_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_{maks}$ (N)	$Rm_s$ (N/mm <sup>2</sup> )
4	68	123,52	88	146,82	110	235,81
5	40	76,97	92	181,44	100	194,18
6	46	94,88	84	173,61	94	152,77
$\bar{x}$	<b>51,33</b>	<b>98,50</b>	<b>88,00</b>	<b>167,30</b>	<b>101,33</b>	<b>194,30</b>
$\sigma_x$	14,74	23,50	4,00	18,20	8,08	41,50

Iz rezultata za drugi ciklus ispitivanja može se zaključiti isto kao u prvom ciklusu ispitivanja. Dodavanjem staklenih vlakana povećava se maksimalna sila koju epruveta može izdržati prije pojave loma pri savojnom opterećenju. Najveću vrijednost savojne čvrstoće pokazale su epruvete iz ploče PMMA 6 koja je ojačana impregniranim staklenim vlaknima, dok su najmanju vrijednost savojne čvrstoće pokazale epruvete iz ploče PMMA 4 koja nije ojačana. Nakon prvog i drugog ciklusa ispitivanja može se zaključiti kako se savojna čvrstoća smanjuje u korelaciji sa smanjivanjem poprečnog presjeka, odnosno debljine epruvete  $h$  u ovom slučaju. Također vrijedi i korelacija povećavanja debljine epruvete  $h$  i iznosa savojne čvrstoće. Navedeno vrijedi nakon što se usporede rezultati ispitivanja ploča koje su ojačane istim staklenim vlaknima te ploča koje nisu ojačane, primjerice ploča PMMA 1 i ploča PMMA 4 koje se razlikuju samo po debljini  $h$ .



### 4.3. Rezultati statičkog vlačnog pokusa

Statički vlačni pokus proveden je na univerzalnoj kidalici kao i pokus savijanja u tri točke, uz korištenje čeljusti koje osiguravaju mogućnost da se epruveta vlačno optereti. Nakon što se epruveta učvrsti u čeljusti ista se opterećuje konstantnim prirastom vlačne sile. Ispitivanje prestaje kada dođe do loma epruvete te se očita maksimalna sila  $F_{maks}$ . Nakon što se očita maksimalna sila izračuna se vlačna čvrstoća pojedine epruvete  $R_m$  prema izrazu 1.3.

$$R_m = \frac{F_{maks}}{b \cdot h} \quad (1.3.)$$

Epruvete su prije ispitivanja izmjerene pomičnim mjerilom. Rezultati su obrađeni kao i kod ispitivanja savijanja u tri točke i udarnog rada loma, odnosno izračunata je standardna devijacija i aritmetička sredina za svaku ploču. Rezultati prvog ciklusa statičkog vlačnog pokusa dani su u tablici 16.

Tablica 16. Rezultati ispitivanja prvog ciklusa statičkog vlačnog pokusa

Prvi ciklus ispitivanja						
Broj epruvete	Ploča					
	PMMA 1		PMMA 2		PMMA 3	
	$F_{maks}$ (N)	$R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_{maks}$ (N)	$R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_{maks}$ (N)	$R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )
7	2060	46,30	2340	53,71	2440	55,81
8	1940	43,06	2320	53,60	2620	61,32
9	2040	45,88	2280	55,33	2600	59,35
$\bar{x}$	<b>2013,30</b>	<b>45,08</b>	<b>2313,30</b>	<b>54,21</b>	<b>2553,30</b>	<b>58,83</b>
$\sigma_x$	64,30	1,76	30,60	0,97	98,70	2,79

Iz rezultata navedenih u tablici 14. može se zaključiti kako u prvom ciklusu ispitivanja, vrijednosti vlačne čvrstoće rastu korištenjem ojačala. Epruveta koja je opet pokazala najveću vrijednost vlačne čvrstoće izrezana je iz ploče PMMA 3 s impregniranim staklenim vlaknima. Nasuprot tome epruveta koja je pokazala najmanju vrijednost vlačne čvrstoće izrezana je iz ploče 1, koja nije ojačana. Uspoređujući ploče PMMA 2 i PMMA 3 možemo primijetiti kako

impregnirana staklena vlakna pružaju veću vrijednost vlačne čvrstoće spram neimpregniranih staklenih vlakana.

Drugi ciklus ispitivanja statičkog vlačnog pokusa proveden je analogno prvom. Sve epruvete su izmjerene te su rezultati maksimalne sile i vlačne čvrstoće prikazani preko aritmetičke sredine i standardne devijacije pojedine ploče. Rezultati drugog ciklusa ispitivanja navedeni su u tablici 17.

Tablica 17. Rezultati ispitivanja drugog ciklusa statičkog vlačnog pokusa

Drugi ciklus ispitivanja						
Broj epruvete	Ploča					
	PMMA 4		PMMA 5		PMMA 6	
	$F_{maks}$ (N)	$R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_{maks}$ (N)	$R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_{maks}$ (N)	$R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )
7	530	43,13	1080	80,97	980	79,70
8	568	45,38	980	81,10	1170	95,16
9	628	50,76	920	74,52	1240	100,85
$\bar{x}$	<b>575,30</b>	<b>46,42</b>	<b>993,30</b>	<b>78,86</b>	<b>1139,00</b>	<b>91,90</b>
$\sigma_x$	49,40	3,92	80,80	3,76	135,50	10,94

Iz rezultata drugog ciklusa statičkog vlačnog pokusa možemo zaključiti kako ploča PMMA 4, koja nije ojačana staklenim vlaknima pokazuje najmanju vrijednost vlačne čvrstoće. Ploča PMMA 6 ojačana impregniranim staklenim vlaknima pokazuje gotovo dvostruko veću vrijednost vlačne čvrstoće od ploče koja nije ojačana. Naravno kao i kod ispitivanja savijanja u tri točke te udarnog rada loma i ovdje postoji pozitivna korelacija debljine uzoraka i vrijednosti vlačne čvrstoće.

Standarna devijacija ukazuje na prosječno odstupanje od aritmetičke sredine. Manja vrijednost standardne devijacije ukazuje na dobru ponovljivost mjernog procesa, odnosno manje rasipanje rezultata mjerenja. Iz navedenih rezultata vidi se kako su vrijednosti standarne devijacije znatno više za drugi ciklus ispitivanja u usporedbi sa prvim ciklusom ispitivanja. Razlog tome je otežano rukovanje i rezanje uzoraka zbog njihove debljine od samo 1,2 mm.

## 5. Analiza prijelomne površine

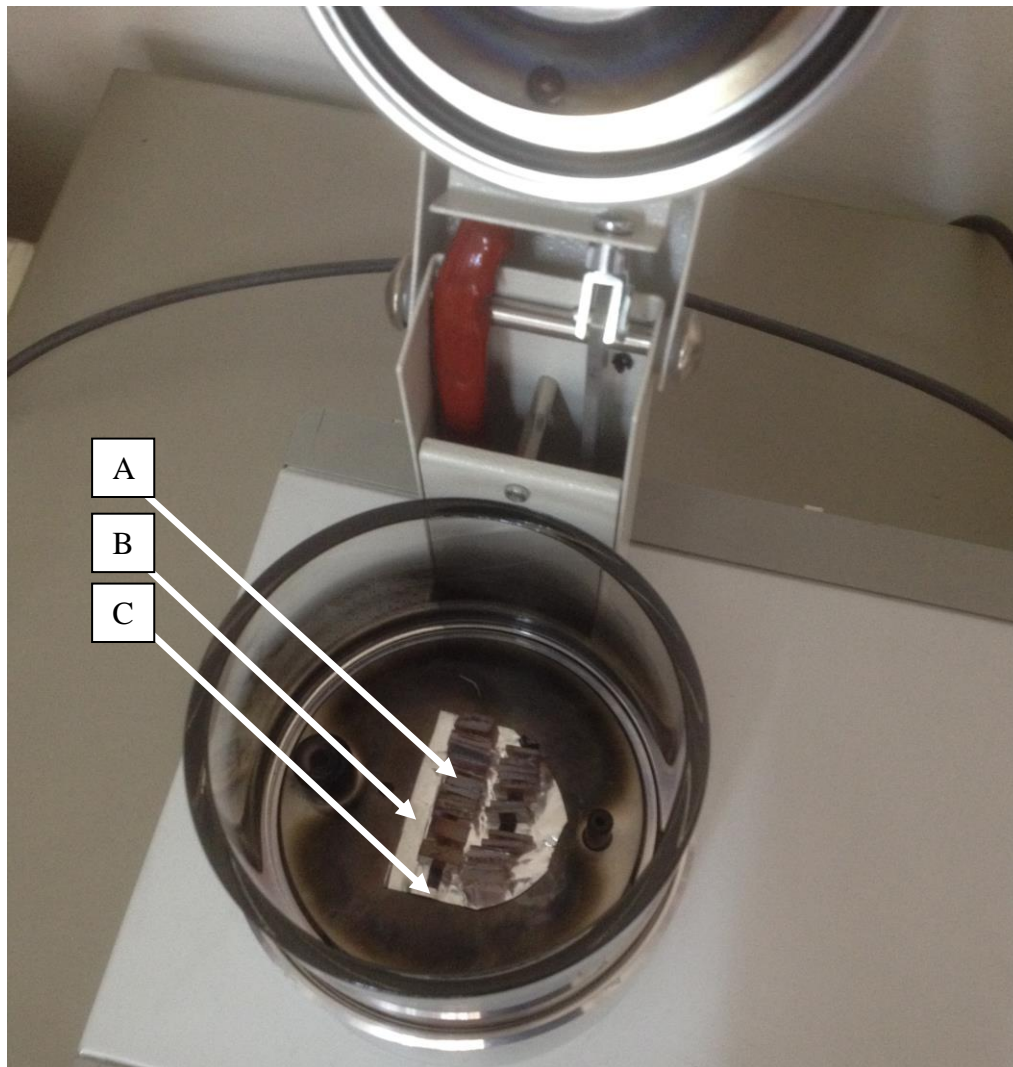
### 5.1. Priprema uzoraka za SEM

Nakon što su ispitana mehanička svojstva, pristupilo se analizi prijelomne površine na skenirajućem elektronskom mikroskopu. Prije same analize na skenirajućem elektronskom mikroskopu uzorke je potrebno očistiti od masnoća i prljavština. Nakon što su uzorci očišćeni, isti su stavljeni u uređaj za neparivanje. Nakon neparivanja uzoraka izvršena je analiza prijelomne površine na SEM-u. Zbog lakšeg rukovanja i skraćivanja ciklusa neparivanja epruvete su prije samog čišćenja odrezane na 1 cm od prijelomne površine. SEM podrazumijeva analizu korištenjem elektronskog snopa te uzorak mora biti električki vodljiv. Električna vodljivost postignuta je neparivanjem tankim slojem legure zlata i paladija od nekoliko nm. Uzorci su postavljeni na aluminijsku podlogu preko koje je naliježljena ugljična traka s adhezivnim sredstvom na obje strane. Na slici 32. vidljiv je uređaj za neparivanje te pripadajući plinski spremnik sa argonom.



Slika 32. Uređaj za neparivanje Emitec

Na slici 33. vidljivi su uzorci postavljeni u komoru uređaja za napanje. Uzorci su prethodno očišćeni od masnoća i prljavština. Također na slici 33. vidljiva je aluminijska podloga i crna ugljična traka. Uzorci su na ugljičnu traku postavljeni pomoću pincete kako ne bi došlo do ponovnog unosa masti i nečistoća na površinu uzoraka.



Slika 33. Uzorci u uređaju za napanje. A - uzorci, B – aluminijska podloga, C - ugljična traka

Uzorci su napanjani 240 sekundi, u zaštitnoj atmosferi argona. Na slici 33. vidljiva je orijentacija uzoraka, odnosno vidljiva je prijelomna površina, dok je površina koja je rezana zalijepljena na ugljičnu traku. Nakon što su uzorci napanjeni, isti se postavljaju u radnu komoru skenirajućeg elektronskog mikroskopa. Prilikom napanjanja, napanjeni su svi uzorci odjednom, dok su prilikom analize na SEM-u uzorci podijeljeni u dvije grupe. Prvo je analizirana grupa uzoraka s prvog ciklusa ispitivanja mehaničkih svojstava, odnosno ploče PMMA 1, PMMA 2 i PMMA 3. Nakon prve ispitane je druga grupa uzoraka s drugog ciklusa ispitivanja mehaničkih svojstava, odnosno ploče PMMA 4, PMMA 5 i PMMA 6.

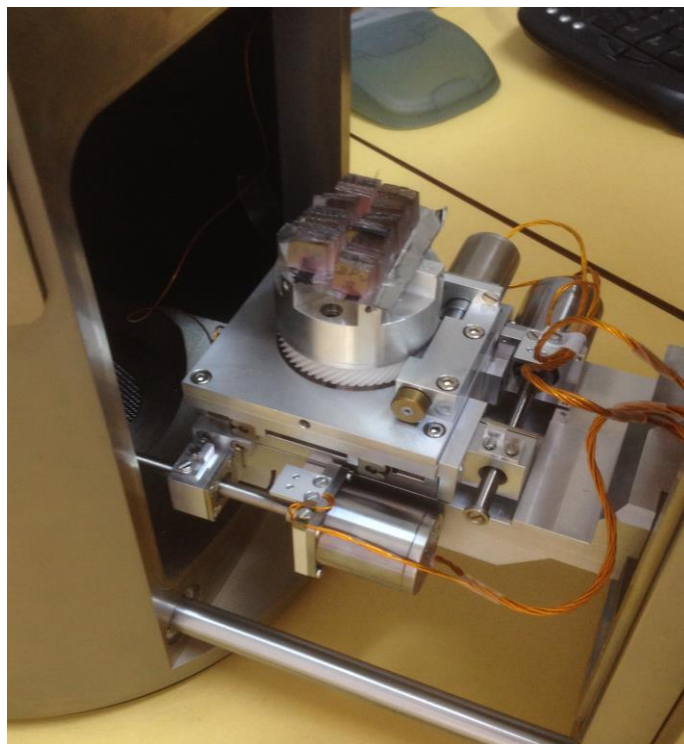
## 5.2. Skenirajući elektronski mikroskop

Za ispitivanje uzoraka u Laboratoriju za materijalografiju, korišten je skenirajući elektronski mikroskop Tescan Vega 5136. Na slici 34. vidljiv je SEM Tescan Vega 5136.



Slika 34. SEM Tescan Vega 5136

Na slici 35. vidljiva je radna komora SEM-a u koju su postavljeni uzorci debljine 4 mm, odnosno ploče PMMA 1,2 i 3. Nakon zatvaranja radne komore SEM-a uspostavi se vakuum.



Slika 35. Radna komora SEM-a Tescan Vega 5136

### **5.2.1. Rezultati analize prijelomne površine**

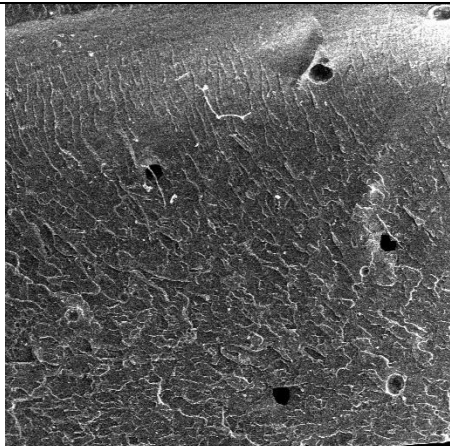
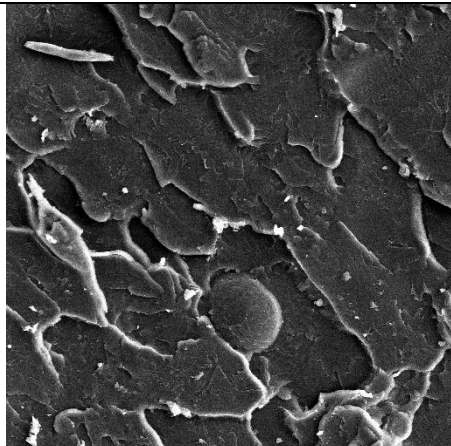
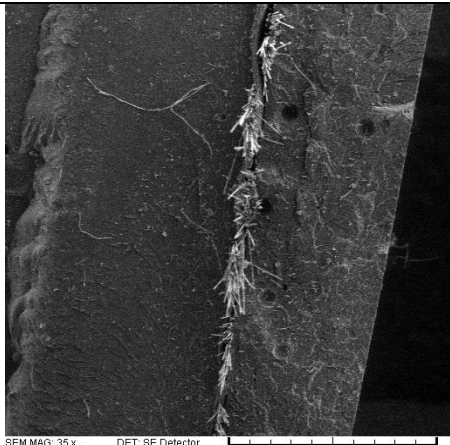
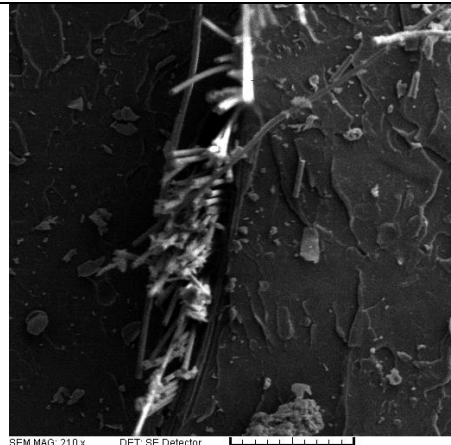
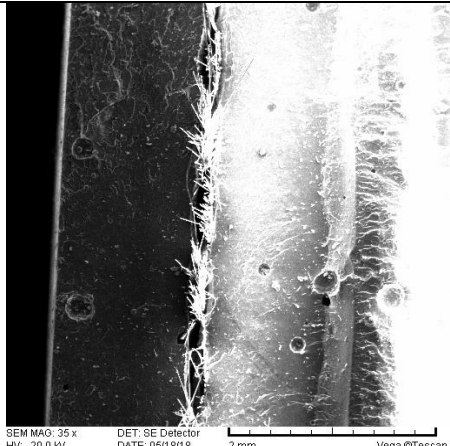
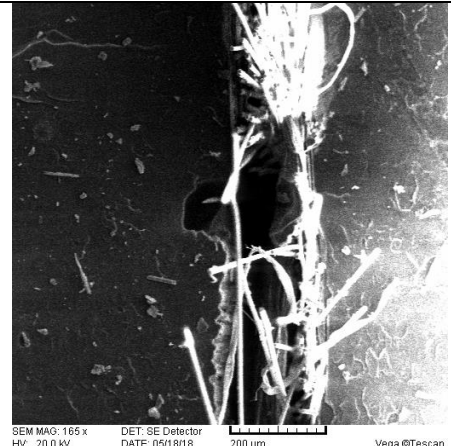
Prvi ciklus ispitivanja činile su tri ploče, PMMA 1, PMMA 2 i PMMA 3. Sa svake ploče analizirana su tri uzorka, odnosno tri prijelomne površine koje su rezultat loma uslijed mehaničkih ispitivanja opisanih u 3. poglavlju ovog diplomskog rada. Svaka prijelomna površina prilikom analize na SEM-u ilustrirana je s dvije slike, prva slika je snimljena uslijed povećanja od 35:1, dok je druga snimljena uslijed povećanja od 400:1. Navedena povećanja na nekim uzorcima su prilagođena na druge vrijednosti koje su blizu povećanja 35:1 i 400:1 zbog bolje kvalitete slika prijelomnih površina. Slike prvog ciklusa ispitivanja grupirane su u tablice prema ispitivanju mehaničkih svojstava radi lakšeg pregleda. Tablice 18., 19. i 20. prikazuju analizu prijelomne površine za sva ispitivanja mehaničkih svojstava tokom prvog ciklusa ispitivanja. Tablica 18. prikazuje analizu prijelomne površine za prvi ciklus ispitivanja savijanja u tri točke. Zatim tablica 19. prikazuje analizu prijelomne površine za prvi ciklus ispitivanja statičkog vlačnog pokusa. Naposljetku tablica 20. prikazuje analizu prijelomne površine za prvi ciklus ispitivanja udarnog rada loma.

Drugi ciklus ispitivanja činile su tri ploče, PMMA 4, PMMA 5 i PMMA 6. Sa svake ploče analizirana su također tri uzorka. Uzorci za drugi ciklus ispitivanja su analizirani pri istim povećanjima kao i uzorci za prvi ciklus ispitivanja. Tablice 21., 22. i 23. prikazuju analizu prijelomne površine za sva ispitivanja mehaničkih svojstava tokom drugog ciklusa ispitivanja. Tablica 21. prikazuje analizu prijelomne površine za drugi ciklus ispitivanja savijanja u tri točke. Zatim tablica 22. prikazuje analizu prijelomne površine za drugi ciklus ispitivanja statičkog vlačnog pokusa. Naposljetku tablica 23. prikazuje analizu prijelomne površine za drugi ciklus ispitivanja udarnog rada loma.

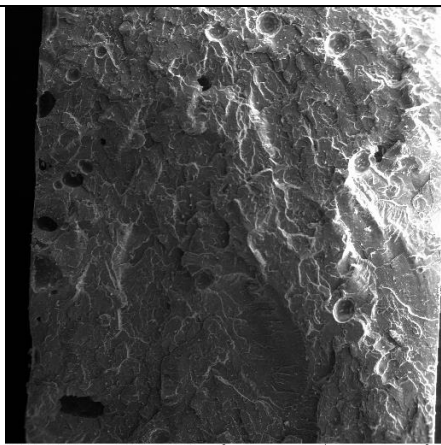
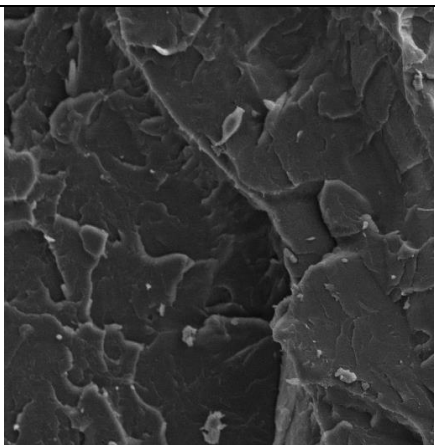
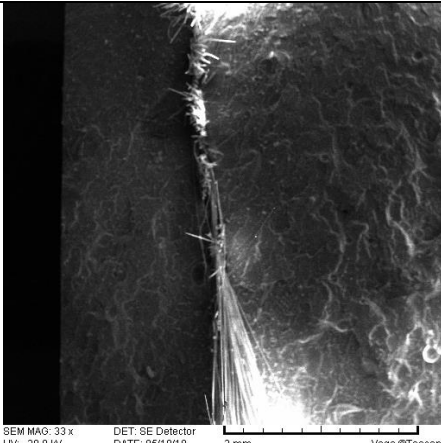
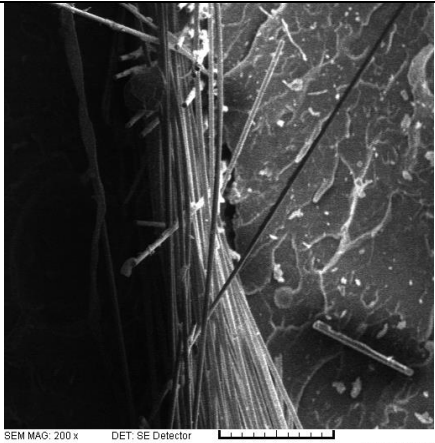
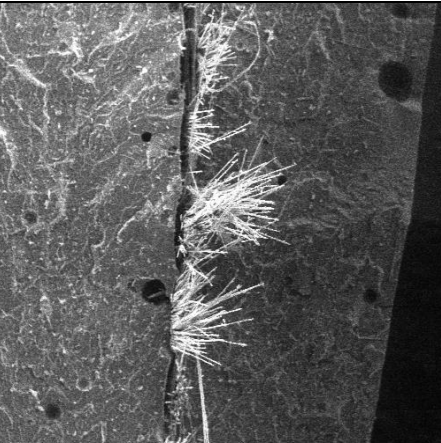
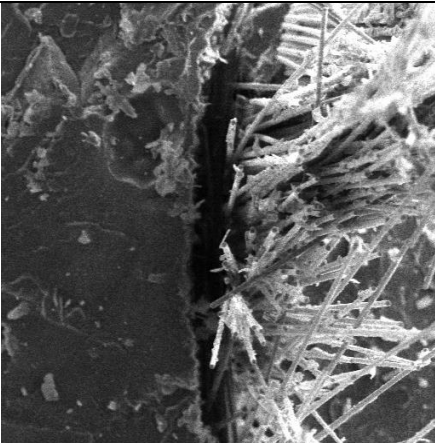
Kod ploča korištenih za prvi ciklus ispitivanja, debljine 4 mm vidljiva je veća količina mjehurića zraka u odnosu na ploče debljine 1,2 mm u drugom ciklusu ispitivanja. Kod ploča PMMA 3 i PMMA 6 vidljivo je djelomično raslojavanje matrice od staklenih vlakana, kod obje ploče radi se o impregniranim staklenim vlaknima. Reakcija polimerizacije PMMA je egzotermna, odnosno oslobađa se toplina te ista može utjecati na svojstva tvari kojom su staklena vlakna impregnirana. Sredstvo impregniranja je nepoznato. Kod ploča PMMA 2 i PMMA 5 vidljiva je kompaktnost staklenih vlakana i polimerne matrice te nije došlo do raslojavanja.



Tablica 18. Analiza prijelomne površina, prvi ciklus – savijanje u tri točke

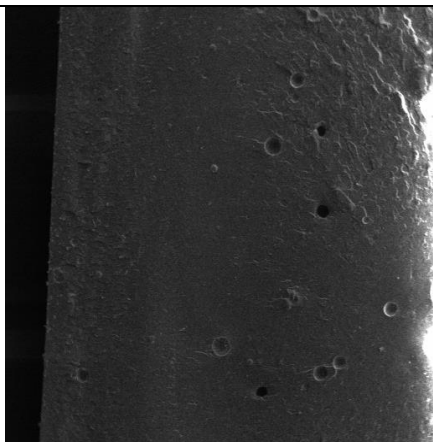
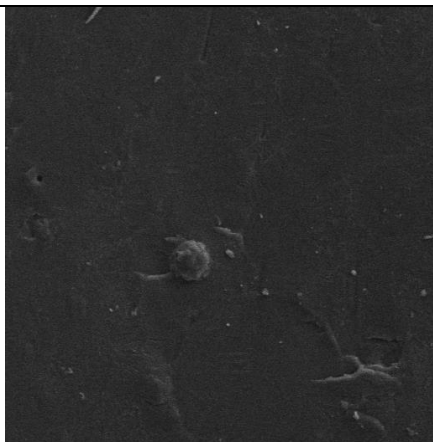
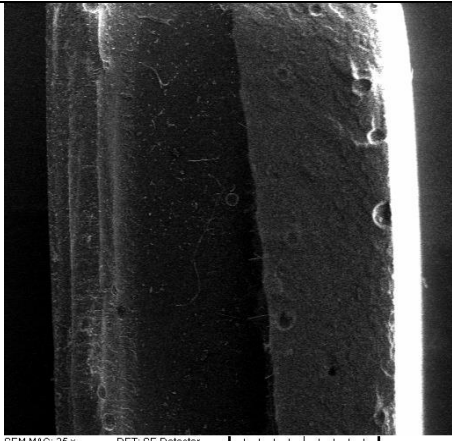
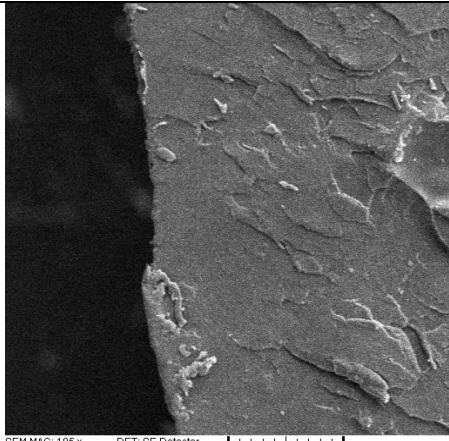
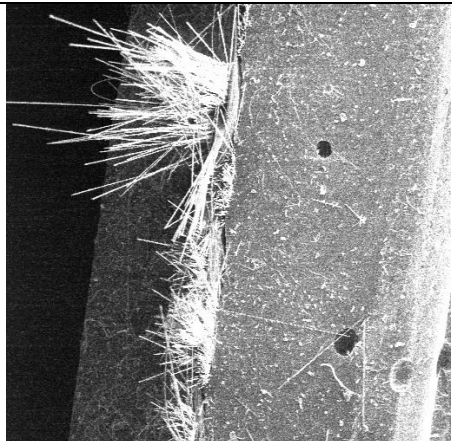
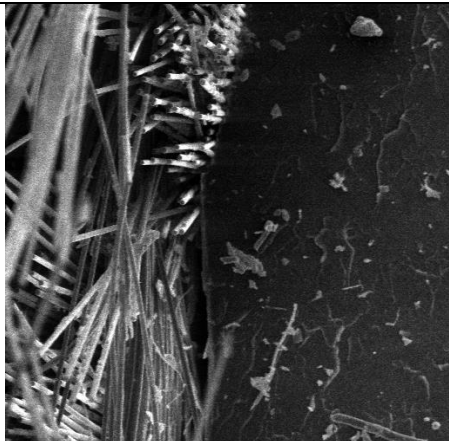
Prvi ciklus ispitivanja – savijanje u tri točke	
Ploča PMMA 1	
 <p>SEM MAG: 43 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM 1 mm Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>	 <p>SEM MAG: 400 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM 100 um Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>
Ploča PMMA 2	
 <p>SEM MAG: 35 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM 2 mm Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>	 <p>SEM MAG: 210 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM 200 um Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>
Ploča PMMA 3	
 <p>SEM MAG: 35 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM 2 mm Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>	 <p>SEM MAG: 165 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM 200 um Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>

Tablica 19. Analiza prijelomne površina, prvi ciklus – statički vlačni pokus

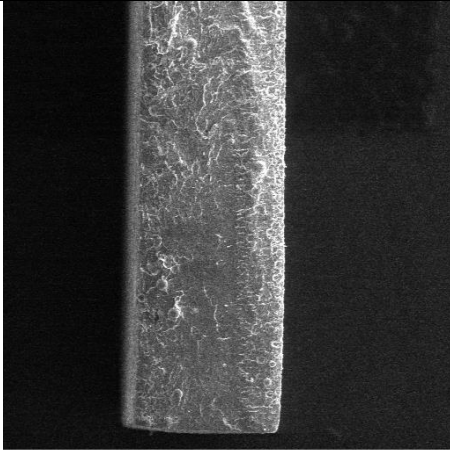
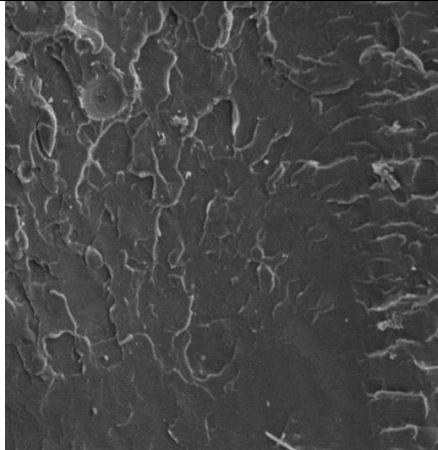

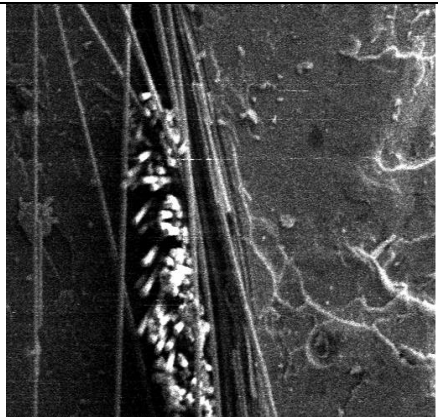
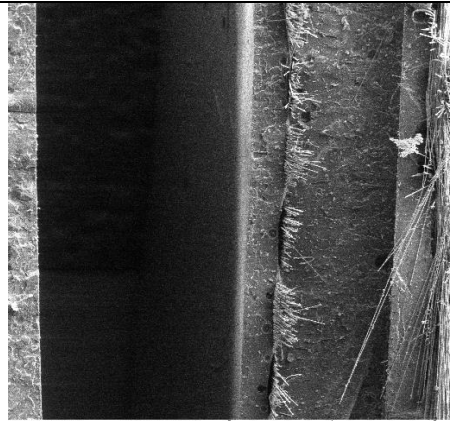
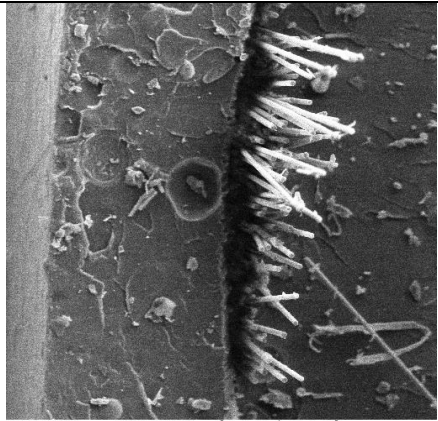
Prvi ciklus ispitivanja – statički vlačni pokus	
Ploča PMMA 1	
 <p>SEM MAG: 35 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM 2 mm Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>	 <p>SEM MAG: 419 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM 100 um Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>
Ploča PMMA 2	
 <p>SEM MAG: 33 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM 2 mm Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>	 <p>SEM MAG: 200 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM 200 um Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>
Ploča PMMA 3	
 <p>SEM MAG: 35 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM 2 mm Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>	 <p>SEM MAG: 200 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM 200 um Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>



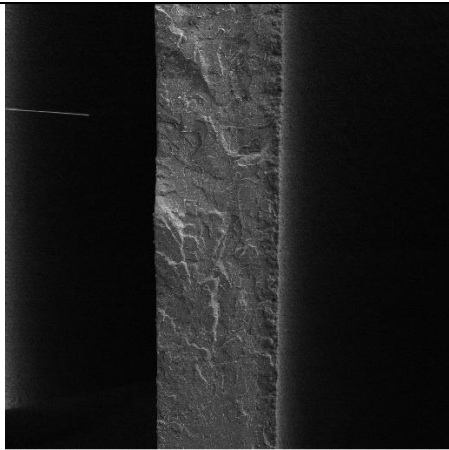
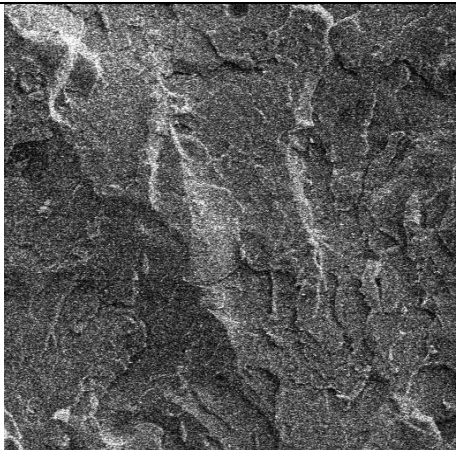
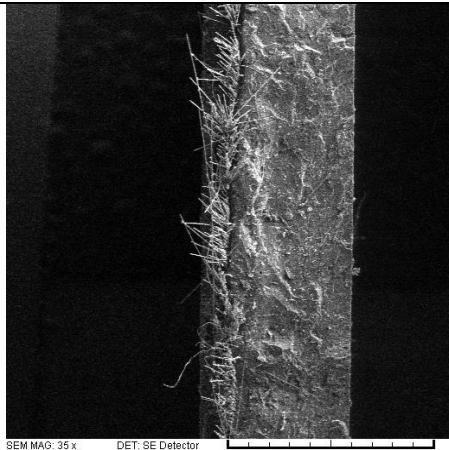
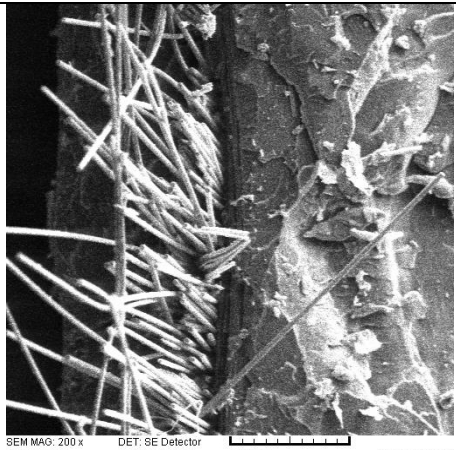
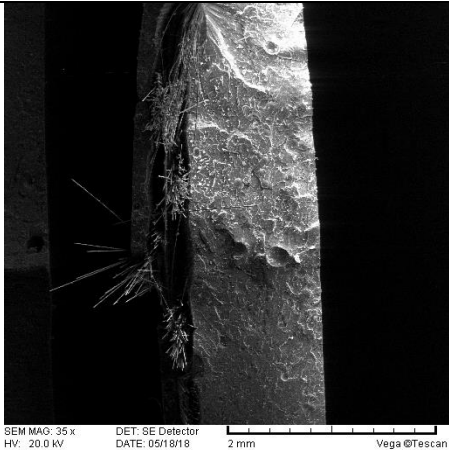

Tablica 20. Analiza prijelomne površina, prvi ciklus – udarni rad loma

Prvi ciklus ispitivanja – udarni rad loma	
Ploča PMMA 1	
 <p>SEM MAG: 36 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM 2 mm Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>	 <p>SEM MAG: 387 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM 100 um Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>
Ploča PMMA 2	
 <p>SEM MAG: 25 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM 2 mm Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>	 <p>SEM MAG: 195 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM 200 um Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>
Ploča PMMA 3	
 <p>SEM MAG: 35 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM 2 mm Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>	 <p>SEM MAG: 200 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM 200 um Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>

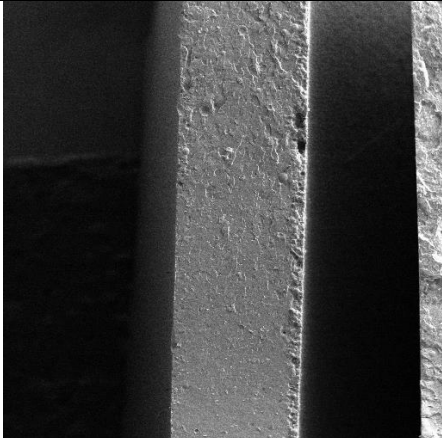
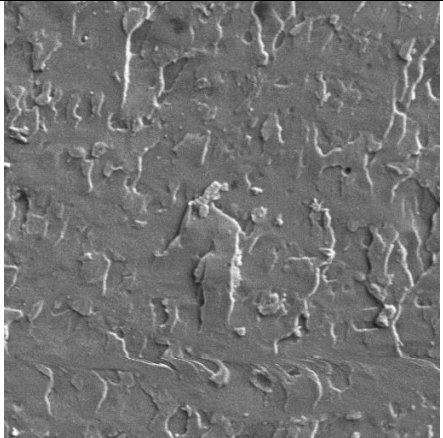
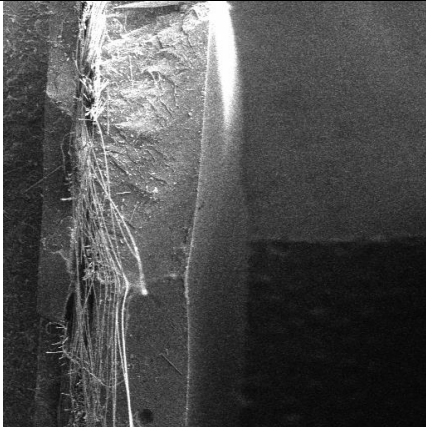
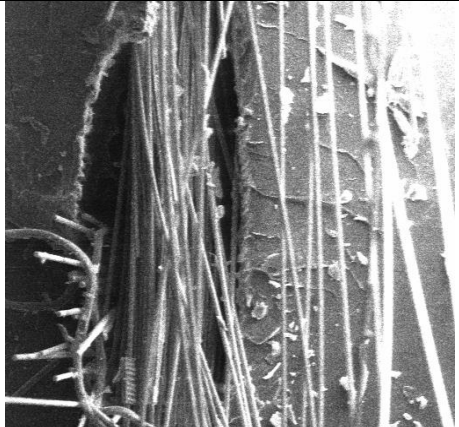
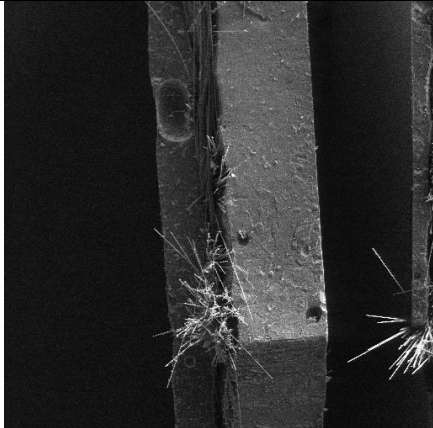
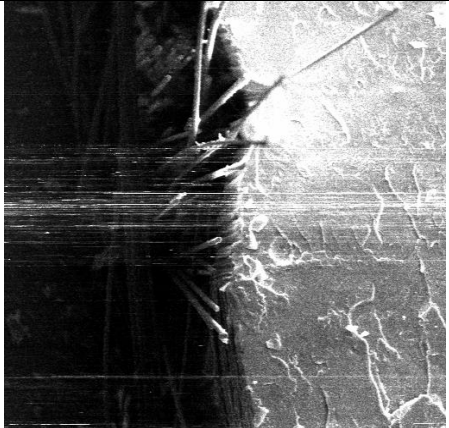
Tablica 21. Analiza prijelomne površina, drugi ciklus – savijanje u tri točke

Drugi ciklus ispitivanja – savijanje u tri točke	
Ploča PMMA 4	
 <p>SEM MAG: 35 x HV: 20.0 kV VAC: HVVac</p> <p>DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM</p> <p>2 mm</p> <p>Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>	 <p>SEM MAG: 197 x HV: 20.0 kV VAC: HVVac</p> <p>DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM</p> <p>200 um</p> <p>Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>
Ploča PMMA 5	
 <p>SEM MAG: 35 x HV: 20.0 kV VAC: HVVac</p> <p>DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM</p> <p>2 mm</p> <p>Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>	 <p>SEM MAG: 205 x HV: 20.0 kV VAC: HVVac</p> <p>DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM</p> <p>200 um</p> <p>Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>
Ploča PMMA 6	
 <p>SEM MAG: 35 x HV: 20.0 kV VAC: HVVac</p> <p>DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM</p> <p>2 mm</p> <p>Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>	 <p>SEM MAG: 201 x HV: 20.0 kV VAC: HVVac</p> <p>DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM</p> <p>200 um</p> <p>Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>

Tablica 22. Analiza prijelomne površina, drugi ciklus – statički vlačni pokus

Drugi ciklus ispitivanja – statički vlačni pokus	
Ploča PMMA 4	
 <p>SEM MAG: 35 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac</p> <p>DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM</p> <p>2 mm</p> <p>Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>	 <p>SEM MAG: 200 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac</p> <p>DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM</p> <p>200 um</p> <p>Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>
Ploča PMMA 5	
 <p>SEM MAG: 35 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac</p> <p>DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM</p> <p>2 mm</p> <p>Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>	 <p>SEM MAG: 200 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac</p> <p>DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM</p> <p>200 um</p> <p>Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>
Ploča PMMA 6	
 <p>SEM MAG: 35 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac</p> <p>DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM</p> <p>2 mm</p> <p>Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>	 <p>SEM MAG: 200 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac</p> <p>DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM</p> <p>200 um</p> <p>Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>

Tablica 22. Analiza prijelomne površina, drugi ciklus – udarni rad loma

Drugi ciklus ispitivanja – udarni rad loma	
Ploča PMMA 4	
 <p>SEM MAG: 35 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac</p> <p>DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM</p> <p>2 mm</p> <p>Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>	 <p>SEM MAG: 200 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac</p> <p>DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM</p> <p>200 um</p> <p>Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>
Ploča PMMA 5	
 <p>SEM MAG: 35 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac</p> <p>DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM</p> <p>2 mm</p> <p>Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>	 <p>SEM MAG: 200 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac</p> <p>DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM</p> <p>200 um</p> <p>Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>
Ploča PMMA 6	
 <p>SEM MAG: 35 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac</p> <p>DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM</p> <p>2 mm</p> <p>Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>	 <p>SEM MAG: 200 x HV: 20.0 kV VAC: HiVac</p> <p>DET: SE Detector DATE: 05/18/18 Device: TS5136MM</p> <p>200 um</p> <p>Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging Laboratory for materialography Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia</p>

## 6. Zaključak

Poli(metil-metakrilat) je najrašireniji akrilat koji se koristi u dentalnoj medicini. PMMA karakterizira slaba žilavost, odnosno velika krhkost. Upravo zbog toga prilikom korištenja zubnih proteza često se događaju lomovi i napuknuća zubnih proteza. Naime zubne proteze su podvrgnute intraolarnom opterećenju koje dosta dobro podnose, problem se javlja uslijed ekstraolarnih događaja koji uključuju različite padove i udarce u zubne proteze. Zubne proteze tada lako pucaju i njihov popravak je skup. Temeljna ideja ovog rada bila je povećati udarni rad loma, odnosno pozitivno doprinijeti svojstvu žilavosti korištenjem staklenih vlakana. Staklena vlakna preuzimaju opterećenja s polimerne matrice koja osigurava njihovu zaštitu od vanjskih utjecaja.

Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava pokazali su poboljšanje sva tri mehanička svojstva uporabom staklenih vlakana. Korištenjem impregniranih staklenih vlakana dobivena su bolja mehanička svojstva u usporedbi s korištenjem neimpregniranih staklenih vlakana. Primjerice prosječna vrijednost udarnog rada loma za neojačanu ploču debljine 1,2 mm iznosi 0,019 J, dok za ploču ojačanu impregniranim staklenim vlaknima iznosi 0,353 J. Kada je u pitanju ploča debljine 4 mm prosječna vrijednost udarnog rada loma za neojačanu ploču iznosi 0,155 J, dok za ojačanu impregniranim staklenim vlaknima iznosi 0,713 J. Prosječna vrijednost vlačne čvrstoće za neojačane epruvete debljine 1,2 mm iznosi 46 N/mm<sup>2</sup>, dok za epruvete ojačane impregniranim staklenim vlaknima iznosi 92 N/mm<sup>2</sup>. Za neojačane epruvete debljine 4 mm prosječna vrijednost vlačne čvrstoće iznosi 45 N/mm<sup>2</sup>, dok za epruvete ojačane impregniranim staklenim vlaknima iznosi 58 N/mm<sup>2</sup>. Prosječna vrijednost savojne čvrstoće za neojačane ploče debljine 1,2 mm iznosi 98 N/mm<sup>2</sup>, dok za ploču ojačanu impregniranim staklenim vlaknima iznosi 194 N/mm<sup>2</sup>. Prosječna vrijednost savojne čvrstoće za ploču debljine 4 mm koja nije ojačana iznosi 56 N/mm<sup>2</sup>, dok za ploču ojačanu impregniranim staklenim vlaknima iznosi 121 N/mm<sup>2</sup>.

Iz navedenih rezultata vidljivo je kako su više poboljšana mehanička svojstva epruveta od 1,2 mm u usporedbi s epruvetama od 4 mm. Od svih navedenih svojstava u dentalnoj praksi je najzanimljivije svojstvo žilavosti, odnosno udarnog rada loma koje nam ukazuje na apsorbiranu energiju prije loma materijala. Impregniranim staklenim vlaknima možemo uvelike poboljšati svojstvo koje predstavlja temeljni problem PMMA koji se za izradu zubnih proteza koristi bez ikakvih ojačanja. Impregniranim staklenim vlaknima postižu se najbolja

mehanička svojstva te su ona jednostavnija za rukovanje. Naime impregnirana staklena vlakna su veće krutosti od neimpregniranih staklenih vlakana što olakšava proces krojenja i prilagođavanja staklenih vlakana modelu pacijentove proteze.

Prilikom analize na skenirajućem elektronskom mikroskopu, kod epruveta debljine 4 mm moguće je primijetiti veće količine mjehurića zraka. Kod epruveta debljine 1,2 mm prevladava minimalna količina mjehurića zraka. Navedeno je moguće poboljšati na način da se ne koriste samo utezi za istiskivanje zraka već vibracijski stol ili tehnika s vakuum pumpom i pokrovnom folijom. Više mjehurića kod uzoraka debljine 4 mm može se pripisati uvjetima rada, odnosno kratkom vremenu za miješanje. Unutar dvije do tri minute odvije se polimerizacija korištenog materijala. Također kod analize na SEM-u može se primjetiti djelomično raslojavanje polimerne matrice i impregniranih staklenih vlakana prilikom loma. Unatoč raslojavanju i dalje su postignuti bolji rezultati mehaničkih svojstava spram neimpregniranih vlakana. Do raslojavanja može doći zbog egzotermne reakcije koja prati polimerizaciju i impregnacijskog sredstva na staklenim vlaknima. Također moguće je da polimerna matrica nije u potpunosti okružila impregnirana staklena vlakna. Navedeno se može izbjeći korištenjem vakuuma i primjenom veće sile na kalup u kojem se nalaze PMMA i impregnirana staklena vlakna.

Naposljetku može se zaključiti kako impregnirana staklena vlakna imaju velik potencijal da budu uključena u proces izrade zubnih proteza. Mehanička svojstva su uvelike poboljšana, dok je utjecaj na debljinu završnog proizvoda zanemariv. Također staklena vlakna karakterizira iritacija sluznice te je jedan od najbitnijih dijelova procesa izrade ovakvih zubnih proteza upravo polaganje vlakana da dođu na sredinu polimerne matrice i završna obrada. Naime ukoliko staklena vlakna izlaze iz polimerne matrice ili nisu u potpunosti prekrivena polimernom matricom doći će do iritacije sluznice pacijenta. Pravim konstrukcijskim i tehnološkim pristupom kompozitne zubne proteze zasigurno mogu zamijeniti standardne proteze sklone lomovima. Tehnologija izrade proteze s staklenim vlaknima nije skupa, staklena vlakna su jeftina i široko dostupna. Ovakav pristup zubnim protezama omogućava veliku financijsku uštedu za pacijenta. Također pacijent se ne izlaže višestrukim odlascima stomatologu radi popravaka i prilagođavanja zubne proteze.



## LITERATURA

- [1] Khindria S K, Mittal S, Sukhija U. Evolution of denture base materials. J Indian Prosthodont Soc 2009;9:64-9
- [2] Bubalo, V., Jerolimov, V., Baučić, I., Andreis, M., Veksli, Z. (2012). Akrilatni polimeri u dentalnoj protetici: Priprava i mehanička svojstva. Polimeri : časopis za plastiku i gumu, 33(1), 22-27
- [3] Bożena Tylińczak, Anna Drabczyk and Sonia Kudłacik-Kramarczyk (November 2nd 2017). Acrylates in Dental Applications, Acrylic Polymers in Healthcare Boreddy Reddy, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.69008.
- [4] Gurbuz O, Unalan F, Dikbas I. Comparison of the transverse strength of six acrylic denture resins. OHDMBSC. 2010;9(1):21-24
- [5] Yamauchi M, Yamamoto K, Wakabayashi M, Kawano J. In vitro adherence of microorganisms to denture base resin with different surface texture. Dental Materials Journal. 1990;9 (1):19-24
- [6] <http://pslc.ws/macrog/images/pmma02.gif>
- [7] [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1464849561-0-polimeri.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1464849561-0-polimeri.pdf)
- [8] [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1431694359-0-ntmpmckompoziti\\_15\\_1.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1431694359-0-ntmpmckompoziti_15_1.pdf)
- [9] [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1369657197-0-materijaliikompoziti2013.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1369657197-0-materijaliikompoziti2013.pdf)
- [10] Pavelić, B., Katanec, D. (2005). Mogućnosti uporabe vlaknima ojačanih kompozita u implantološkoj terapiji
- [11] Frederick T. Wallenberger, James C. Watson, and Hong Li, PPG Industries, Inc. Glass Fibers, ASM Handbook, Vol. 21: Composites. 2001.
- [12] <https://netcomposites.com/media/1217/weave-table.jpg?width=375&height=203>
- [13] <https://www.arenapoliklinika.hr/protetika/proteze/>
- [14] <http://www.juniordentist.com/wp-content/uploads/2014/06/Are-all-Dentures-created-equal.jpg>
- [15] Ahmed Omran Alharebac Hazizan Md Akilab Zainal Arifin Ahmad, Impact strength, fracture toughness and hardness improvement of PMMA denture base through addition of nitrile rubber/ceramic fillers. The Saudi Journal for Dental Research Volume 8, Issues 1–2, January–July 2017, 26-34

- 
- [16] Rama Krishna Alla, Suresh Sajjan, Venkata Ramaraju Alluri, Kishore Ginjupalli, Nagaraj Upadhyaya, Influence of Fiber Reinforcement on the Properties of Denture Base Resins, *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, 2013, 4, 91-97
- [17] Gad MM, Al-Thobity AM, Shahin SY, Alsaqer BT, Ali AA. Inhibitory effect of zirconium oxide nanoparticles on *Candida albicans* adhesion to repaired polymethyl methacrylate denture bases and interim removable prostheses: a new approach for denture stomatitis prevention. *International Journal of Nanomedicine*. 2017;12:5409-5419.
- [18] [https://www.kulzer.com/media/webmedia\\_local/downloads\\_new/meliodent\\_1/meliodent\\_rr/GBA\\_MelioDent\\_RR\\_Regio\\_INT.pdf](https://www.kulzer.com/media/webmedia_local/downloads_new/meliodent_1/meliodent_rr/GBA_MelioDent_RR_Regio_INT.pdf)
- [19] <http://kelteks.hr/kompoziti2.php?gs=34>

## **PRILOZI**

### **I. CD-R disc**